RC8kaUMDVEErPdWtMsLzNgG6TwA7HFLs2TvTL7ew

CONCEPTUAL

Decimosegunda edición

CONCEPTUAL

CONCEPTUAL

Decimosegunda edición

escrito e ilustrado por

Paul G. Hewitt

City College of San Francisco

TRADUCCIÓN

Víctor Campos Olguín

Traductor profesional

REVISIÓN TÉCNICA

Guillermo Alberto Govea Anaya

Sandra Lilia Castillo Flores

Universidad Nacional Autónoma de México

Instituto Tecnológico de Estudios Superiores

Campus Aguascalientes

Elías Loyola Campos

Universidad Panamericana

Campus Bonaterra

Datos de catalogación

Autor: Paul G. Hewitt

Física conceptual

12ª edición

Pearson Educación de México, S.A. de C.V., México, 2016

ISBN: 978-607-32-3822-9

Área: Bachillerato / Ciencias

Formato: 21 x 27 cm

Páginas: 816

Traducción autorizada de la edición en idioma inglés, titulada CONCEPTUAL PHYSICS, por PAUL G. HEWITT, publicada por Pearson Education, Inc., y otras afiliaciones. Copyright © 2015. Todos los derechos reservados.

Authorized translation from the U. S. English language edition, entitled CONCEPTUAL PHYSICS, by PAUL G. HEWITT, Copyright © 2015. Published by Pearson Education Inc., or its affiliates. Used by

permission. All Rights Reserved.

ISBN 13: 978-0-321-90910-7

Esta edición en español es la única autorizada para ser publicada por Pearson Educación de México S.A. de C.V. Copyright © 2016. Pearson Education, Inc., y otras afiliaciones.

Edición en inglés

• **Publisher:** Jim Smith • **Project Manager:** Chandrika Madhavan • **Assistant Editor:** Kyle Doctor • **Marketing Manager:** Will Smith

• **Program Manager:** Mary O'Connell • **Senior Content Producer:** Kate Brayton • **Production Service and Composition:** Cenveo® Publisher Services • **Project Manager, Production Service:** Cindy Johnson • **Copyeditor:** Carol Reitz • **Design Manager:** Derek Bacchus • **Text Design:** Tamara Newnam • **Cover Designer:** Tamara Newnam • **Illustrations:** Rolin Graphics, Inc. • **Photo Researcher:** Stephen Merland, PreMediaGlobal • **Image Lead:** Maya Melenchuk • **Manufacturing Buyer:** Jeffrey Sargent • **Printer and Binder:** Courier/Kendallville • **Cover Printer:** Lehigh/Phoenix • **Cover Photo Credit:** Top Seller/Shutterstock **FÍSICA CONCEPTUAL**

Decimosegunda edición en español

• **Director general:** Sergio Fonseca • **Director de innovación y servicios educativos:** Alan David Palau • **Gerente de contenidos y servicios editoriales:** Jorge Luis Íñiguez • **Gerente de arte y diseño:** Asbel Ramírez • **Coordinadora de contenidos de bachillerato y custom:** Lilia Moreno • **Especialista de contenidos de aprendizaje:** Berenice Torruco • **Coordinadora de arte y diseño:**

Mónica Galván • **Supervisor de arte y diseño:** Timoteo Eliosa • **Supervisora de desarrollo:** Olga Sánchez • **Correctora de estilo:** Elia Olvera

• **Composición y diagramación:** Carácter tipográfico • **Lectores de pruebas:** Javier García, Nelly Godoy, Teresa Parra **Contacto:** soporte@pearson.com

DECIMOSEGUNDA EDICIÓN, 2016

D.R. © 2016 por Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

Avenida Antonio Dovalí Jaime Núm. 70

Torre B, Piso 6, Colonia Zedec Ed. Plaza Santa Fe,

Delegación Álvaro Obregón, Ciudad de México, CP 01210.

Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana Reg. Núm. 1031

ISBN LIBRO IMPRESO: 978-607-32-3822-9

ISBN E-BOOK: 978-607-32-3818-2

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de esta publicación pueden reproducirse, registrarse o transmitirse, por un sistema de recuperación de información en ninguna forma ni por ningún medio, sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin permiso previo por escrito del editor.

Para mis nietos, Manuel, Marie, Kara, Alexander, Megan, Grace, y Emily y para todos los estudiantes que luchan por aprender física.

Contenido breve

Para el estudiante

xvi

P A R T E C I N C O

Electricidad y magnetismo

405

Para el instructor

xvii

22 Electrostática

406

1 Acerca de la ciencia

2

23 Corriente eléctrica

430

24 Magnetismo

452

25 Inducción electromagnética

469

P A R T E U N O

Mecánica

19

P A R T E S E I S

2 Primera ley de Newton

Luz

485

de movimiento: inercia

20

26 Propiedades de la luz

486

3 Movimiento lineal

39

27 Color

504

4 Segunda ley de Newton de movimiento

57

28 Reflexión y refracción

519

5 Tercera ley de Newton de movimiento

74

29 Ondas de luz

544

6 Cantidad de movimiento

90

30 Emisión de luz

562

7 Energía

109

31 Cuantos de luz

582

8 Movimiento rotacional

132

9 Gravedad

160

P A R T E S I E T E

10 Movimiento de proyectiles y satélites

182

Físicas atómica y nuclear

601

P A R T E D O S

32 El átomo y el cuanto

602

Propiedades de la materia

207

33 El núcleo atómico y la radiactividad

615

34 Fisión y fusión nucleares

637

11 La naturaleza atómica de la materia

208

12 Sólidos

226

P A R T E O C H O

13 Líquidos

244

Relatividad

657

14 Gases

264

35 Teoría de la relatividad especial

658

P A R T E T R E S

36 Teoría de la relatividad general

686

Calor

283

APÉNDICE

A Sobre la medición

15 Temperatura, calor y expansión

284

y la conversión de unidades

703

16 Transferencia de calor

302

APÉNDICE

B Más sobre el movimiento

709

17 Cambio de fase

320

APÉNDICE

C Elaboración de gráficas

713

18 Termodinámica

336

APÉNDICE

D Aplicaciones de los vectores

716

APÉNDICE

E

Crecimiento exponencial

P A R T E C U A T R O

Sonido

355

y tiempo de duplicación

719

RESPUESTAS A PROBLEMAS

19 Vibraciones y ondas

356

CON NÚMERO IMPAR

S-1

20 Sonido

374

GLOSARIO

G-1

21 Sonidos musicales

391

CRÉDITOS

C-1

ÍNDICE

I-1

PRACTICANDO LA FÍSICA

31

Para el estudiante

xvi

2.6 Fuerza de sostén

32

Para el instructor

xvii

2.7 Equilibrio de cosas en movimiento

32

Agradecimientos

xxi

2.8 La Tierra en movimiento

33

1 Acerca de la ciencia

2

3 Movimiento lineal

39

1.1 Mediciones científicas

3

3.1 El movimiento es relativo

40

Cómo Eratóstenes midió el tamaño de la Tierra 3

3.2 Rapidez

41

Tamaño de la Luna

4

Rapidez instantánea

41

Distancia a la Luna

5

Rapidez promedio

41

Distancia al Sol

6

3.3 Velocidad

42

Tamaño del Sol

7

Velocidad constante

43

Matemáticas: el lenguaje de la ciencia

8

Velocidad variable

43

1.2 Métodos científicos

8

3.4 Aceleración

43

La actitud científica

8

Aceleración sobre los planos inclinados

1.3 Ciencia, arte y religión

12

de Galileo

45

PSEUDOCIENCIA

13

3.5 Caída libre

46

1.4 Ciencia y tecnología

14

Qué tan rápido

46

VALORACIÓN DEL RIESGO

14

Qué tan lejos

48

1.5 Física: la ciencia básica

15

TIEMPO “DE VUELO”

50

1.6 En perspectiva

16

Qué tan rápido cambia el "qué tan rápido"

50

P A R T E U N O

3.6 Vectores de velocidad

51

Mecánica

19

4 Segunda ley de Newton

de movimiento

57

2 Primera ley de Newton

de movimiento: inercia

20

4.1 La fuerza causa aceleración

58

4.2 Fricción

59

2.1 Aristóteles en movimiento

21

4.3 Masa y peso

61

Copérnico y la Tierra en movimiento

22

La masa resiste la aceleración

63

ARISTÓTELES (384-322 a. C.)

23

4.4 Segunda ley de Newton de movimiento 63

2.2 Los experimentos de Galileo

23

4.5 Cuando la aceleración es *g*: caída libre 64

La torre inclinada

23

4.6 Cuando la aceleración es menor que

Planos inclinados

23

g: caída no libre

65

GALILEO GALILEI (1564-1642)

24

5 Tercera ley de Newton

2.3 Primera ley de Newton de movimiento 26

de movimiento

74

ENSAYO PERSONAL

27

2.4 Fuerza neta y vectores

28

5.1 Fuerzas e interacciones

75

Vectores de fuerza

29

5.2 Tercera ley de Newton de movimiento 76

2.5

La regla del equilibrio

30

Define tu sistema

77

vii

viii

CO N T EN I D O

5.3 Acción y reacción sobre masas

8.5 Fuerza centrípeta

145

diferentes

79

PRACTICANDO LA FÍSICA: BALANCEO

PRACTICANDO LA FÍSICA: GUERRA

DE CUBETA CON AGUA

146

DE JALAR LA SOGA

81

8.6 Fuerza centrífuga

147

5.4 Vectores y la tercera ley

82

Fuerza centrífuga en un marco de

5.5 Resumen de las tres leyes de Newton

85

referencia en rotación

147

6 Cantidad de movimiento

90

Gravedad simulada

148

8.7 Cantidad de movimiento angular

150

6.1 Cantidad de movimiento

91

8.8 Conservación de la cantidad

6.2 Impulso

92

de movimiento angular

151

6.3 El impulso cambia la cantidad

9

de movimiento

93

Gravedad

160

Caso 1: Aumento de la cantidad de movimiento 93

9.1 La ley de gravitación universal

161

Caso 2: Disminución de la cantidad de

9.2 La constante de gravitación

movimiento durante un tiempo prolongado

94

universal, *G*

163

Caso 3: Disminución de la cantidad

9.3 Gravedad y distancia: la ley

de movimiento durante un tiempo breve

94

del inverso al cuadrado

164

6.4 Rebote

96

9.4 Peso e ingravidez

166

6.5 Conservación de la cantidad

9.5 Mareas oceánicas

167

de movimiento

97

Mareas en la tierra y la atmósfera

170

LEYES DE CONSERVACIÓN

98

Abultamientos de marea en la Luna

170

6.6 Colisiones

99

9.6 Campos gravitacionales

170

6.7 Colisiones más complicadas

102

Campo gravitacional en el interior de un planeta 171

7 Energía

109

Teoría de gravitación de Einstein

173

9.7 Agujeros negros

174

7.1 Trabajo

110

9.8 Gravitación universal

175

Potencia

112

Energía mecánica

113

10 Movimiento de proyectiles

7.2 Energía potencial

113

y satélites

182

7.3 Energía cinética

114

10.1 Movimiento de proyectiles

183

7.4 Teorema trabajo-energía

115

Proyectiles lanzados horizontalmente

184

7.5 Conservación de la energía

117

Proyectiles lanzados en un ángulo

186

ENERGÍA Y TECNOLOGÍA

118

PRACTICANDO LA FÍSICA: CUENTAS

FÍSICA EN EL CIRCO

119

COLGANTES PRÁCTICAS

187

Energía reciclada

119

NUEVA VISITA AL “TIEMPO

7.6 Máquinas

120

DE VUELO”

190

7.7 Eficiencia

121

10.2 Proyectiles con movimiento rápido:

7.8 Fuentes de energía

123

satélites

190

CIENCIA BASURA

125

10.3 Órbitas satelitales circulares

192

8 Movimiento rotacional

132

10.4 Órbitas elípticas

194

MONITORIZACIÓN MUNDIAL

8.1 Movimiento circular

133

VÍA SATÉLITE

195

RUEDAS EN LOS FERROCARRILES 135

10.5 Leyes de movimiento planetario

8.2 Inercia rotacional

136

de Kepler

196

8.3 Momento de torsión

139

CÓMO ENCONTRAR TU CAMINO 197

8.4 Centro de masa y centro de gravedad 140

10.6 Conservación de energía

Ubicación del centro de gravedad

142

y movimiento de satélites

197

Estabilidad

143

10.7 Rapidez de escape

198

P A R T E D O S

14 Gases

264

Propiedades de la materia 207

14.1 La atmósfera

265

14.2 Presión atmosférica

266

11 La naturaleza atómica

El barómetro

268

de la materia

208

14.3 Ley de Boyle

270

14.4 Flotabilidad del aire

271

11.1 La hipótesis atómica

209

14.5 El principio de Bernoulli

272

LA CAÍDA DE ALICIA

210

Aplicaciones del principio de Bernoulli

274

11.2 Características de los átomos

210

PRACTICANDO LA FÍSICA

275

11.3 Imágenes atómicas

212

14.6 Plasma

276

11.4 Estructura atómica

213

Plasma en el mundo cotidiano

276

Los elementos

214

Electricidad plasmática

277

11.5 La tabla periódica de los elementos

215

Tamaños relativos de los átomos

215

P A R T E T R E S

11.6 Isótopos

218

Calor

283

11.7 Compuestos y mezclas

219

11.8 Moléculas

220

15 Temperatura, calor

11.9 Antimateria

221

y expansión

284

Materia oscura

222

12 Sólidos

226

15.1 Temperatura

285

15.2 Calor

287

12.1 Estructura cristalina

227

Medición del calor

289

EL PODER DE LOS CRISTALES

229

15.3 Capacidad calorífica específica

289

12.2 Densidad

229

15.4 La alta capacidad calorífica específica

12.3 Elasticidad

230

del agua

290

12.4 Tensión y compresión

232

15.5 Expansión térmica

291

PRACTICANDO LA FÍSICA:

Expansión del agua

293

FUERZA DE LAS VARAS

233

VIDA EN LOS EXTREMOS

295

12.5 Arcos

234

16 Transferencia de calor

302

FABRICACIÓN ADITIVA

O IMPRESIÓN 3-D

235

16.1 Conducción

303

12.6 Escalamiento

236

16.2 Convección

304

13 Líquidos

244

PRACTICANDO LA FÍSICA

307

16.3 Radiación

307

13.1 Presión

245

Emisión de energía radiante

308

13.2 Presión de un líquido

246

Absorción de energía radiante

309

13.3 Flotabilidad

249

Reflexión de energía radiante

310

13.4 Principio de Arquímedes

250

Enfriamiento en la noche mediante radiación 310

13.5 ¿Qué hace que un objeto se hunda

16.4 Ley de Newton de enfriamiento

311

o flote?

251

16.5 El efecto invernadero

312

13.6 Flotación

253

16.6 Cambio climático

313

MONTAÑAS FLOTANTES

254

16.7 Energía solar

314

13.7 Principio de Pascal

255

PRACTICANDO LA FÍSICA

315

13.8 Tensión superficial

257

16.8 Cómo controlar la transferencia

13.9 Capilaridad

258

de calor

315

17 Cambio de fase

320

20 Sonido

374

17.1 Fases de la materia

321

20.1 La naturaleza del sonido

375

17.2 Evaporación

321

Origen del sonido

375

17.3 Condensación

323

Medios que transmiten el sonido

376

Condensación en la atmósfera

324

20.2 El sonido en el aire

376

La niebla y las nubes

325

BOCINA

378

17.4 Ebullición

325

Rapidez del sonido en el aire

378

Géiseres

326

PRACTICANDO LA FÍSICA

379

La ebullición es un proceso de enfriamiento

326

Energía en ondas sonoras

379

Ebullición y congelación al mismo tiempo

327

20.3 Reflexión del sonido

379

17.5 Fusión y congelación

327

20.4 Refracción del sonido

380

Rehielo

328

20.5 Vibraciones forzadas

382

17.6 Energía y cambios de fase

328

Frecuencia natural

382

PRACTICANDO LA FÍSICA

332

20.6 Resonancia

382

18 Termodinámica

336

20.7 Interferencia

384

20.8 Batimientos

385

18.1 Termodinámica

337

18.2 El cero absoluto

337

TRANSMISIONES DE RADIO

386

Energía interna

339

21 Sonidos musicales

391

18.3 La primera ley de la termodinámica

339

18.4 Procesos adiabáticos

341

21.1 Ruido y música

392

18.5 La meteorología y la primera ley

341

21.2 Altura

393

18.6 La segunda ley de la termodinámica

344

21.3 Intensidad del sonido y sonoridad

394

Máquinas térmicas

344

21.4 Calidad

395

¡ESCENIFICACIÓN DE LA

21.5 Instrumentos musicales

396

TERMODINÁMICA!

346

21.6 Análisis de Fourier

397

18.7 La energía tiende a dispersarse

347

21.7 De analógico a digital

399

18.8 Entropía

349

P A R T E C I N C O

P A R T E C U A T R O

Sonido

355 Electricidad y magnetismo 405

19 Vibraciones y ondas

356

22 Electrostática

406

22.1 Electricidad

407

19.1 Buenas vibraciones

357

Vibración de un péndulo

358

Fuerzas eléctricas

408

19.2 Descripción de ondas

358

22.2 Cargas eléctricas

408

22.3 Conservación de la carga

409

19.3 Movimiento ondulatorio

360

PRACTICANDO LA FÍSICA

361

TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

Ondas transversales

361

Y CHISPAS

410

Ondas longitudinales

361

22.4 Ley de Coulomb

411

19.4 Rapidez de ondas

362

22.5 Conductores y aislantes

412

19.5 Interferencia de ondas

363

Semiconductores

412

Ondas estacionarias

364

Superconductores

413

19.6 Efecto Doppler

365

22.6 Carga

413

19.7 Ondas de proa

367

Carga mediante fricción y contacto

413

19.8 Ondas de choque

367

Carga por inducción

414

CO N T EN I D O

xi

22.7 Polarización de la carga

416

25 Inducción electromagnética 469

22.8 Campo eléctrico

417

25.1 Inducción electromagnética

470

HORNO DE MICROONDAS

418

Blindaje eléctrico

419

25.2 Ley de Faraday

472

25.3 Generadores y corriente alterna

473

22.9 Potencial eléctrico

421

Almacenamiento de energía eléctrica

423

25.4 Producción de potencia

474

Generador Van de Graaff

424

Potencia de turbogenerador

474

Potencia MHD

475

23 Corriente eléctrica

430

25.5 Transformadores

475

25.6 Autoinducción

478

23.1 Flujo de carga y corriente eléctrica

431

25.7 Transmisión de potencia

479

23.2 Fuentes de voltaje

432

25.8 Inducción de campo

479

23.3 Resistencia eléctrica

433

23.4 La ley de Ohm

434

P A R T E S E I S

La ley de Ohm y el choque eléctrico

435

Luz

485

23.5 Corriente directa y corriente alterna

437

Conversión de CA a CD

437

26 Propiedades de la luz

486

23.6 Rapidez y fuente de los electrones

en un circuito

438

26.1 Ondas electromagnéticas

488

23.7 Potencia eléctrica

440

26.2 Velocidad de una onda

23.8 Lámparas

441

electromagnética

488

23.9 Circuitos eléctricos

441

26.3 El espectro electromagnético

489

Circuitos en serie

442

ANTENAS FRACTALES

490

CELDAS DE COMBUSTIBLE

442

26.4 Materiales transparentes

491

Circuitos en paralelo

443

26.5 Materiales opacos

493

Circuitos en paralelo y sobrecarga

445

Sombras

494

Fusibles de seguridad

445

26.6 Viendo la luz: el ojo

496

24 Magnetismo

452

27 Color

504

24.1 Magnetismo

453

27.1 Color en el mundo

505

24.2 Polos magnéticos

454

27.2 Ref lexión selectiva

505

24.3 Campos magnéticos

455

27.3 Transmisión selectiva

507

24.4 Dominios magnéticos

456

27.4 Mezcla de luces de colores

507

24.5 Corrientes eléctricas y campos

Colores primarios

508

magnéticos

458

Colores complementarios

509

PRACTICANDO LA FÍSICA

458

27.5 Mezcla de pigmentos de colores

509

24.6 Electroimanes

459

27.6 Por qué el cielo es azul

511

Electroimanes superconductores

459

27.7 Por qué los atardeceres son rojos

512

24.7 Fuerzas magnéticas

460

PRACTICANDO LA FÍSICA

513

Sobre las partículas cargadas en movimiento 460

27.8 Por qué las nubes son blancas

514

Sobre los alambres portadores de corriente

460

27.9 Por qué el agua es azul verdoso

514

Medidores eléctricos

461

28 Ref lexión y refracción

519

Motores eléctricos

462

24.8 El campo magnético de la Tierra

462

28.1 Ref lexión

520

Rayos cósmicos

464

Principio del tiempo mínimo

520

24.9 Biomagnetismo

465

28.2 La ley de ref lexión

521

IRM: IMÁGENES POR RESONANCIA

Espejos planos

522

MAGNÉTICA

465

Reflexión difusa

523

28.3 Refracción

524

31.7 Principio de incertidumbre

592

Índice de refracción

526

31.8 Complementariedad

595

Espejismos

526

PREDICTIBILIDAD Y CAOS

596

28.4 La causa de la refracción

527

28.5 La dispersión y los arcoíris

529

P A R T E S I E T E

28.6 Ref lexión total interna

531

Físicas atómica y nuclear

601

28.7 Lentes

533

Formación de imágenes por una lente

534

32 El átomo y el cuanto

602

PRACTICANDO LA FÍSICA

535

28.8 Defectos en las lentes

537

32.1 Descubrimiento del núcleo atómico

603

29 Ondas de luz

544

32.2 Descubrimiento del electrón

604

32.3 Espectros atómicos: pistas para

29.1 Principio de Huygens

545

la estructura atómica

606

29.2 Difracción

547

32.4 Modelo de Bohr del átomo

607

29.3 Superposición e interferencia

549

32.5 Explicación de los niveles de energía

29.4 Interferencia en películas delgadas

552

cuantizados: ondas de electrones

608

Interferencia en películas delgadas

32.6 Mecánica cuántica

610

de un solo color

552

32.7 Principio de correspondencia

611

Colores de interferencia

553

BOSÓN DE HIGGS

612

PRACTICANDO LA FÍSICA

554

29.5 Polarización

555

33 El núcleo atómico

Visualización tridimensional

557

y la radiactividad

615

29.6 Holografía

559

30 Emisión de luz

562

33.1 Los rayos X y la radiactividad

616

33.2 Rayos alfa, beta y gamma

617

30.1 Emisión de luz

563

33.3 Radiación ambiental

619

30.2 Excitación

564

Unidades de radiación

619

30.3 Espectros de emisión

566

Dosis de radiación

620

30.4 Incandescencia

567

Trazadores radiactivos

621

30.5 Espectros de absorción

569

33.4 El núcleo atómico y la

30.6 Fluorescencia

570

fuerza fuerte

622

30.7 Fosforescencia

571

33.5 Vida media radiactiva

625

30.8 Lámparas

572

33.6 Detectores de radiación

626

Lámpara incandescente

572

33.7 Transmutación de elementos

628

Lámpara fluorescente

572

Transmutación natural

628

Lámpara fluorescente compacta

573

Transmutación artificial

630

Diodo emisor de luz

573

33.8 Datación radiométrica

630

30.9 Láseres

574

IRRADIACIÓN DE ALIMENTOS

632

31 Cuantos de luz

582

34 Fisión y fusión nucleares

637

31.1 El nacimiento de la teoría cuántica

583

34.1 Fisión nuclear

639

31.2 Cuantización y la constante de Planck 584

31.3 Efecto fotoeléctrico

585

34.2 Reactores de fisión nuclear

641

31.4 Dualidad onda-partícula

588

PLUTONIO

643

31.5 Experimento de la doble rendija

588

34.3 El reactor reproductor

644

31.6 Partículas como ondas: difracción

34.4 Energía eléctrica mediante fisión

644

de electrones

590

34.5 Equivalencia masa-energía

645

FÍSICA EN LA SEGURIDAD

36.3 Gravedad y tiempo: corrimiento

AEROPORTUARIA

649

gravitacional al rojo

691

34.6 Fusión nuclear

649

36.4 Gravedad y espacio: el movimiento

34.7 Cómo controlar la fusión

652

de Mercurio

694

36.5 Gravedad, espacio y una nueva

P A R T E O C H O

geometría

694

Relatividad

657

36.6 Ondas gravitacionales

696

36.7 Gravitación newtoniana

35 Teoría de la relatividad

y einsteiniana

697

especial

658

Epílogo

701

35.1 El movimiento es relativo

659

APÉNDICE A

El experimento de Michelson y Morley

660

Sobre la medición y la conversión

35.2 Postulados de la teoría de

de unidades

703

la relatividad especial

661

35.3 Simultaneidad

662

APÉNDICE B

35.4 El espacio-tiempo y la dilatación

Más sobre el movimiento

709

del tiempo

663

LECTURA DEL TIEMPO DURANTE

APÉNDICE C

UN VIAJE EN TRANVÍA

667

Elaboración de gráficas

713

El viaje del gemelo

668

APÉNDICE D

35.5 Suma de velocidades

673

Aplicaciones de los vectores

716

Viaje espacial

674

SALTOS CENTENARIOS

675

APÉNDICE E

35.6 Contracción de la longitud

675

Crecimiento exponencial y tiempo

35.7 Cantidad de movimiento relativista

677

de duplicación

719

35.8 Masa, energía y E 5 mc 2

678

Respuestas a problemas con número

35.9 Principio de correspondencia

680

impar

S-1

36 Teoría de la relatividad

Glosario

G-1

general

686

Créditos

C-1

36.1 Principio de equivalencia

687

Índice

I-1

36.2 Doblamiento de la luz por

la gravedad

689

Álbum fotográfico

de *Física conceptual*

F *ísica conceptual* es un libro muy personal, lo que se refleja en sus muchas fotografías de familiares y amigos, quienes se mezclan con colegas y amigos en todo el mundo. Muchas de estas personas están identificadas en las fotografías de apertura de capítulo y, con algunas excepciones, no repetiré sus nombres aquí. Sólo mencionaré a los familiares y amigos cuyas fotografías forman parte de las secciones de apertura. Comenzamos en la página 1, donde mi sobrino nieto Evan Suchocki sostiene un pol ito mientras se sienta en mi regazo.

La Parte Uno abre en la página 19 con Charlotte Ackerman, la hija de mis amigos Duane Ackerman y Ellen Hum. La Parte Dos abre con Andrea Wu (quien también aparece en las páginas 131 y 492), hija de mi amigo en Hawái, Chiu Man Wu (página 322). La Parte Tres abre en la página 244 con el pequeño de cuatro años de edad, Francesco Ming Giovannuzzi, de Florencia, Italia, nieto de mis amigos Keith y Tsing Bardin (página 245). La Parte Cuatro, en la página 355, muestra a Abby Dijamco, hija de mi finada asistente de profesor CCSF, la dentista Stella Dijamco. En la Parte Cinco, en la página 405, está mi nieta Megan, hija de Leslie y Bob Abrams. La Parte Seis, en la página 485, abre con el sobrino de Lilian, Christopher Lee. La Parte Siete, página 452, muestra a William Davis, hijo de mis amigos Alan y Fe Davis. Mi nieta Grace Hewitt abre la Parte Ocho en la página 657.

Los amigos y colegas del City College de San Francisco abren varios

capítulos y se mencionan en dichos espacios. Las fotografías que son figuras incluyen a Will Maynez, el diseñador y constructor de la pista de aire que se muestra en la página 100, quien aparece de nuevo asando un cacahuate en la página 298. Diana Lininger Markham se muestra en las páginas 29 y 159. Fred Cauthen suelta pelotas en la página 127.

Amigos instructores de física de otros colegios y universidades incluyen a Evan Jones, quien juega con Bernoulli en la página 264 y muestra la iluminación LED en la página 573. De Egipto, Mona El Tawil-Nassar ajusta las placas de un capacitor en la página 423. Sanjay Rebello, de la Kansas State University, Manhattan, aparece en la página 138. De Hawái, Walter Steiger aparece en la página 627. Chuck Stone muestra una rampa de energía en la página 185.

Amigos profesores de física de bachillerato incluyen al retirado Marshal Ellenstein, quien balancea el balde lleno de agua en la página 146, camina descalzo sobre vidrio roto en la página 263, y posa con Richard Feynman en la página 544. Otros profesores de física de Illinois son Ann Brandon, quien viaja en un colchón de aire en la página 268, y Tom Senior, quien hace música en la página 403.

Las fotografías familiares comienzan con mi esposa Lillian y conmigo, para mostrar que uno no puede tocar sin ser tocado, en la página 81. Otra fotografía actualizada que vincula lo conmovedor con la tercera ley de Newton muestra a mi hermano Stephen con su hija Gretchen en la página 87. El hijo de Stephen, Travis, está en la página 154, y su hija mayor, Stephanie, en las páginas 230, 543 y 686. Mi hijo Paul se muestra en las páginas 305 y 340. Mi nuera, Ludmila Hewitt, sostiene unos **xiv**

Á l bu m f oto g r Á fi Co de l a *Fí s i c a co n cep t ua l* **xv**

Polaroids cruzados en la página 556. La encantadora mujer de la página 215 es mi hija Leslie Abrams, coautora en ciencias de la tierra de los libros *Conceptual Physical Science*. Esta colorida fotografía de Leslie ha sido la marca de *Física conceptual* desde la tercera edición. Una imagen más reciente de ella con su esposo, Bob, se presenta en la página 486. Sus hijos, Megan y Emily (página 554), junto con los hijos de Paul, Alex (página 90) y Grace (página 391), conforman el colorido conjunto de fotografías de la página 510. Las fotografías de mi finado hijo james están en las páginas 150, 394, y 536. Él me dejó a mi primer nieto, Manuel, quien se ve en las páginas 234 y 383. La abuela de Manuel, mi esposa Millie, quien murió en 2004, sostiene valientemente su mano sobre la olla de presión activa en la página

306. Mi hermano David y su esposa Barbara demuestran la presión atmosférica en la página 269. Su hijo, también David, electricista, está en la página 445, y el nieto john Perry Hewitt está en la página 276.

Mi hermana Marjorie Hewitt Suchocki, escritora y teóloga emérita en la Claremont School of Theology, ilustra la reflexión en la página 522. El hijo de Marjorie, john Suchocki, autor de *Química conceptual*, quinta edición, y coautor de química de los libros *Conceptual Physical Science*, también es cantante y autor de canciones, conocido como john Andrew; él toca su guitarra en la página 472. El grupo que escucha la música en la página 399 es parte de la fiesta de bodas de john y Tracy; de izquierda a derecha: el finado Butch Orr, mi sobrina Cathy Candler (página 136 y su hijo Garth Orr en la página 226), la novia y el novio, mi sobrina joan Lucas (página 39), mi hermana Marjorie, los padres de Tracy, Sharon y David Hopwood, los profesores Kellie Dippel y Mark Werkmeister, y yo.

Las fotografías de la familia de Lillian incluyen a su padre (mi suegro), Wai Tsan Lee, quien muestra la inducción magnética en la página 457, y a su madre (mi sue-gra), Siu Bik Lee, quien hace buen uso de la energía solar en la página 315. Mis sobrinos, Erik y Allison Wong, ilustran de manera dramática la termodinámica, en la página 346.

Mis amigos personales, que anteriormente fueron mis alumnos, comienzan con Tenny Lim, ingeniero aeroespacial en el jet Propulsion Lab de Pasadena, quien tensa su arco en la página 115. Esta fotografía ha aparecido en cada libro desde la sexta edición. Ella se ve con su esposo Mark Clark, en Segways, en la página 144. Otro de mis protegidos es la científica aeroespacial Helen Yan, quien está involucrada en el desarrollo de sensores de formación de imágenes satelitales para Lockheed Martin en Sunnyvale, además de enseñar física de tiempo parcial en el CCSF (página 121), y nuevamente posa con Richard Feynman y Marshal Ellenstein en la página 544. En la página 150 Cliff Braun está en la extrema izquierda de mi hijo james en la figura 8.50, con mi sobrino Robert Baruffaldi en la extrema derecha. Alexei Cogan demuestra el centro de gravedad en la página 143, y la chica karateca de la página 95 es Cassy Cosme.

Tres queridos amigos de mis días de escuela son Howard Brand en la página 90, Dan johnson en la página 336, y su esposa Sue en la página 39 (la primera remero en el bote). Bay, el nieto de Dan y Sue johnson, toca el piano en la página 396. Otros queridos amigos son Ryan Patterson, quien resuena en la página 383, y Paul Ryan, el cual pasa su dedo a través de plomo fundido en la página 331. Mi influencia científica de los días de pintar letreros es Burl Grey, quien se muestra

en la página 30 (con una discusión de pintar letreros en la página 27), y jacques Fresco está en la página 133. Mi querido amigo Dennis McNelis come pizza en la página 309. Larry y Tammy Tunison usan dosímetros en la página 621 (los perros de Tammy están en la página 320). Greta Novak flota en agua muy densa en la página 263, y su hijo Bruce Novak muestra dos versiones del espectro de color en la página 489. Emily, la hija de Duane Ackerman, mira a través de novedosos lentes en la página 537. Peter Rea, de Arbor Scientific, está en la página 187. Paul Stokstad, de PASCO, se muestra en la página 132, y David y Christine Vernier, de Vernier Software, están en la página 109.

La inclusión de estas personas tan queridas para mí, hacen que *Física conceptual* sea aún más una obra de amor.

Para el estudiante

Tú sabes que no puedes disfrutar un juego a

menos que conozcas sus reglas; ya sea un juego de

béisbol, un juego de computadora o simplemente un juego de mesa. Del mismo modo, no podrás apreciar por completo tu entorno hasta que comprendas las reglas de la naturaleza. La física es el estudio de dichas reglas, que muestran cómo todo en la naturaleza está hermosamente conectado. De modo que la principal razón para estudiar física es mejorar la forma en la que ves el mundo físico. Verás la estructura matemática de la física en ecuaciones frecuentes; pero, más que recetas para hacer cálculos, verás las ecuaciones como **guías para pensar**.

Yo disfruto la física, y tú también lo harás, porque la entenderás. De modo que busca comprender los conceptos mientras lees este libro. Tu comprensión de la física debe remontar el vuelo.

¡Disfruta tu física!

Para el instructor

La secuencia de capítulos en esta decimosegunda edición es idéntica a la de la edición anterior. Lo nuevo son los perfiles de personalidad extendidos al principio de cada capítulo, que destacan a un científico, profesor o figura histórica que complementa el material del capítulo. Cada capítulo comienza con un montaje fotográfico de profesores, y en ocasiones de sus hijos, quienes dan vida a la enseñanza de la física.

Como con la edición anterior, el Capítulo 1, “Acerca de la ciencia”, comienza el curso con una nota alta al cubrir las primeras mediciones de la Tierra y las distancias hacia la Luna y el Sol. Se espera que las sorprendentes fotografías de mi esposa Lillian rodeada con manchas de luz en la acera abajo de un gran árbol resulten motivantes para uno de mis proyectos favoritos, que consiste en que los estudiantes investiguen las manchas redondas producidas por un pequeño orificio en un trozo de cartón sostenido en la luz solar, y luego vayan más allá para demostrar que mediciones simples conducen a descubrir el diámetro del Sol.

La Parte Uno, “Mecánica”, comienza con el Capítulo 2, que, como en la edición anterior, presenta un breve panorama histórico de Aristóteles y Galileo, y avanza hacia la primera ley de Newton y hacia el equilibrio mecánico. Se introducen los vectores de fuerza principalmente para fuerzas que son mutuamente paralelas.

Los vectores se extienden a la velocidad en el siguiente Capítulo 3, y en el Capítulo 5 se tratan los vectores tanto de fuerza como de velocidad y sus componentes.

El Capítulo 3, “Movimiento lineal”, es el único capítulo de la Parte Uno que está desprovisto de leyes físicas. La cinemática no tiene leyes, sólo definiciones, principalmente para la *rapidez*, la *velocidad* y la *aceleración*, probablemente los conceptos menos excitantes que ofrece el curso. Con mucha frecuencia la cinemática se convierte en un “agujero negro” pedagógico en la educación: mucho tiempo para tan poca física. Al ser más matemática que física, las ecuaciones cinemáticas pueden parecerle al estudiante lo más intimidante del libro. Aunque el ojo experimentado no las ve como tales, los *estudiantes* las ven al principio inexplicables o inentendibles:

$$\% = \%0 + d\ni$$

$$\% = \%0\ni + 12\, d\ni\, 2$$

$$\%2 = \%\, 2$$

$$0 + 2d\%$$

$$\%\, a = 121\%0 + \%2$$

Tradicionalmente, los cursos de física han dado mucho peso a la cinemática con poca o nula cobertura a la física moderna. El decaimiento radiactivo casi nunca consigue la atención que se le da a los cuerpos que caen. De modo que mi recomendación es pasar

rápidamente a través del Capítulo 3, hacer la distinción entre velocidad y aceleración, y luego avanzar hacia el Capítulo 4, “Segunda ley de Newton de movimiento”, donde los conceptos de velocidad y aceleración encuentran su aplicación.

xvii

xviii

Pa r a el i n s t ruC to r

El Capítulo 5 continúa con la tercera ley de Newton. En el Apéndice D se encuentra más acerca de vectores.

El Capítulo 6, “Cantidad de movimiento”, es una extensión lógica de la tercera ley de Newton. Una razón por la que prefiero enseñarlo antes que enseñar energía es que los estudiantes encuentran *mv* mucho más simple y fácil de entender que 1 *mv* 2. Otra razón para tratar primero la cantidad de movimiento es que los vecto-2res de los capítulos previos se emplean con cantidad de movimiento, mas no con energía.

El Capítulo 7, “Energía”, es un capítulo más largo, rico en ejemplos cotidianos y preocupaciones energéticas actuales. La energía es central para la mecánica, de modo que este capítulo tiene la mayor cantidad de material al final del capítulo (80 ejercicios).

Después de los Capítulos 8 y 9 (acerca de mecánica rotacional y gravedad), la mecánica culmina con el Capítulo 10 (acerca de movimiento de proyectiles y movimiento de satélites). Los estudiantes están fascinados por aprender que cualquier proyectil que se mueve suficientemente rápido puede convertirse en un satélite terrestre. Si se mueve incluso más rápido, puede convertirse en un satélite del Sol.

El movimiento de proyectiles y el movimiento de satélites van de la mano.

La Parte Dos, “Propiedades de la materia”, presenta capítulos acerca de átomos, sólidos, líquidos y gases, que en gran medida son iguales a la edición anterior. Nuevas aplicaciones, algunas bastante atractivas, aumentan el gusto de estos capítulos.

Las Partes de la Tres a la Ocho continúan, como las partes anteriores, con ejemplos enriquecidos de tecnología actual. La nueva iluminación con CFL y LED

del Capítulo 23 tiene más tratamiento en el Capítulo 30. Los capítulos con menos cambios son los Capítulos 35 y 36, acerca de la relatividad especial y general, respectivamente.

Al final de cada una de las ocho partes hay un **Examen de práctica**, y la mayoría presenta 30 preguntas de opción múltiple. Las respuestas aparecen al final del libro, como en la edición anterior. Al final del libro se proporcionan las respuestas a los ejercicios con número impar, así como soluciones a *todo* el material de fin de capítulo.

Como con las ediciones anteriores, algunos capítulos incluyen ensayos breves en recuadros acerca de temas como energía y tecnología, ruedas de ferrocarril, bandas magnéticas en tarjetas de crédito, y trenes de levitación magnética. También se presentan recuadros acerca de pseudociencia, que culminan con el temor público acerca de la irradiación de alimentos y cualquier cosa nuclear. Para la persona que trabaja en la arena de la ciencia, quien sabe acerca del cuidado, la comprobación y la verificación cruzada que acompañan a la comprensión de algo, las malas interpretaciones pseudocientíficas son risibles. Pero para quienes no trabajan en la arena científica, incluidos incluso los mejores estudiantes, la pseudociencia puede parecer atractiva cuando los proveedores arropan sus mercaderías con el lenguaje de la ciencia mientras habilidosamente dejan a un lado las doctrinas de la ciencia.

Esperamos ayudar a frenar esta creciente marea.

El material al final del capítulo comienza con un **Resumen de términos**. Después aparecen **Preguntas conceptuales** que resumen los puntos principales del capítulo. Los estudiantes pueden encontrar las respuestas a estas preguntas, palabra por palabra, en la lectura. Los ejercicios **Sustituye y listo** son para familiarizarse con las ecuaciones. Como se introdujo en ediciones anteriores, se han recibido muchos buenos comentarios acerca de los ejercicios **Piensa y clasifica**. Para comparar

cantidades en situaciones similares se requiere pensamiento crítico. Proporcionar una respuesta no es suficiente; la respuesta debe compararse con otras y se pide una clasificación de mayor a menor. Considero que esto es lo más valioso que se ofrece en el material al final del capítulo.

Los ejercicios **Piensa y explica** son las bases de la física conceptual. Muchos requieren pensamiento crítico, mientras que algunos están diseñados para conectar conceptos con situaciones familiares. La mayoría de los capítulos también tienen secciones **Piensa y discute** (que están diseñados para la discusión entre los estudiantes). En los conjuntos de ejercicios **Piensa y resuelve** se encuentran más desafíos físico-matemáticos. Estos problemas son mucho menos numerosos que los de Piensa y explica y los de Piensa y clasifica.

PA R A EL I N S T RUC TO R

Nuevas características en esta edición

La mayor adición a esta edición son los 147 **screencasts Hewitt-Drew-It** que se encuentran en el idioma inglés y se presentan en YouTube desde 2012. Los códigos QR

a lo largo del libro vinculan al estudiante con estas lecciones de asesoría creadas por mí y embellecidas por mi esposa. Sentimos que estas lecciones son la aportación más **SCREENCAST: Conservación**

de la cantidad de movimiento

reciente e importante para hacer la física correcta y comprensible. Complementan muy bien el material de capítulo de esta edición. Simplemente escanea los códigos QR en el libro con tu teléfono inteligente o dispositivo electrónico y una app para leer código QR. Después de escanear el código, podrás ver en línea los screencasts Hewitt-Drew-It. (Nota: Pueden aplicar cargos por uso de datos. El contenido de las lecciones en los screencasts está en inglés.)

Todavía se incluyen los perfiles de físicos o profesores de física de la edición anterior, con la inclusión de nuevas personas. Al aprender más

acerca de las personas detrás del contenido del capítulo, el lector obtiene un gusto más personalizado de la física.

En esta edición se incluye más acerca de vectores de fuerza y de velocidad, así como del cambio climático. A lo largo del libro se encuentran nuevas actualizaciones acerca de la física actual. Nuevos recuadros incluyen impresión 3D, operación GPS y el bosón de Higgs.

El material al final de capítulo se reorganizó con numeración consecutiva para ayudar a asignar tareas en casa.

Considero a éste como el mejor libro de física que he escrito.

Agradecimientos

Sigo estando enormemente agradecido con Ken Ford, quien revisó la precisión de esta edición y por sus muchas sugerencias perspicaces. Hace muchos años, admiré uno de los libros de Ken, *Basic Physics*, que fue el que me inspiró para escribir *Física conceptual*. En la actualidad, me siento honrado de que él haya dedicado tanto de su tiempo y de su energía para ayudar a hacer de esta edición un hermoso libro. Invariablemente, los errores surgen una vez enviado el manuscrito, de modo que yo asumo toda la responsabilidad por cualquier error que haya sobrevivido a su escrutinio.

Por sus lúcidas adiciones, agradezco a mi esposa Lillian, a Bruce Novak, Marshall Ellenstein y Evan Jones. Aprecio las sugerencias de Tomas Brage, J. Ronald Galli, John Hubisz, David Kagan, Sebastian Kuhn, Carlton Lane, Anne Tabor-Morris, Derek Muller, Fred Myers, Chris Thron, Jeff Wetherhold y P. O. Zetterberg.

Por las valiosas sugerencias realizadas en las ediciones anteriores, agradezco a mis amigos Dean Baird, Howard Brand, George Curtis, Alan Davis, Marshall Ellenstein, Mona El Tawil-Nassar, Herb Gottlieb, Jim Hicks, Peter Hopkinson, John Hubisz, Marilyn Hromatko, Dan Johnson, David Kagan, Juliet Layugan, Paul McNamara, Fred Myers, Diane Riendeau, Chuck Stone, Lawrence Weinstein y Phil Wolf. Otros que proporcionaron sugerencias en años anteriores son Matthew Griffiths, Paul Ham-mer, Francisco Izaguirre, Les Sawyer, Dan Sulke y Richard W. Tarara. Siempre estaré agradecido por los comentarios de mis amigos y colegas del Exploratorium: Judith Brand, Paul Doherty, Ron Hipschman, Eric Muller y Modesto Tamez.

Sigo agradecido con los autores de los libros que inicialmente sirvieron como influencia y referencia hace muchos años: Theodore Ashford, *From Atoms to Star*; Albert Baez, *The New College Physics: A*

Spiral Approach; John N. Cooper y Alpheus W. Smith, *Elements of Physics*; Richard P. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics*; Kenneth Ford, *Basic Physics*; Eric Rogers, *Physics for the Inquiring Mind*; Alexander Taffel, *Physics: Its Methods and Meanings*; UNESCO, *700 Science Experiments for Everyone*, y Harvey E. White, *Descriptive College Physics*.

También sigo agradecido con Robert Park, cuyo libro *Voodo Science* me motivó a incluir recuadros acerca de pseudociencia.

Estoy particularmente agradecido con mi esposa, Lillian Lee Hewitt, por sus nuevas fotografías y por la ayuda en todas las fases de la preparación del libro. Agradezco a mi sobrina Gretchen Hewitt Rojas por su ayuda en las fotografías. Mi más grande aprecio a Ken Ford y Bruce Novak, quienes brindaron especial atención a esta edición.

Llevar a Bruce a bordo fue muy, muy afortunado.

Por su dedicación a esta edición, agradezco al personal de Addison Wesley en San Francisco. Estoy especialmente agradecido con Jim Smith, editor en jefe, y con Chandrika Madhavan, editor de proyecto. Agradezco a Cindy Johnson, gerente de proyecto, Carol Reitz, editora, y al equipo de producción de Cenveo Publisher Services por su paciencia con mis ediciones y revisiones de último minuto o con peticiones para afinación. ¡He sido bendecido con un equipo de primera línea!

Paul G. Hewitt

San Petersburgo, Florida

¡Caramba, tío abuelo Paul! Antes de que este pol ito agotara los recursos de su espacio interior y asomara la cabeza por el cascarón, debió de haber pensado que estaba en sus últimos momentos. Pero lo que parecía su final, en realidad fue un nuevo comienzo. ¿Acaso somos como los pol itos, listos para asomar la cabeza a un nuevo ambiente y una nueva comprensión de nuestro lugar en el Universo?

1 **1**

C A P Í T U L O 1

Acerca de la

ciencia

1.1

Mediciones científicas

2

1.2

Métodos científicos

1.3

Ciencia, arte y religión

1.4

Ciencia y tecnología

1.5

Física: la ciencia básica

1.6

En perspectiva

3

1 Las manchas circulares de luz que rodean a Lillian son

imágenes del Sol proyectadas a través de los pequeños claros que

se abren entre las hojas de los árboles arriba de ella. **2** La vista completa del Sol se bloquea a medida que la Luna avanza enfrente

de él. **3** Las manchas circulares se vuelven crecientes durante el eclipse parcial de Sol.

C A PÍ T U LO 1 ACERC A D E L A CI EN CI A

3

Ser el segundo mejor no estuvo tan mal para el Mucha información conteni-matemático griego Eratóstenes de Cirene (276-194 da en el Mouseion entraba en a. C.). Fue apodado “Beta” por sus contemporá-conflicto con creencias muy

neos, quienes lo consideraban el segundo mejor en muchos

valoradas que profesaban

campos, incluidos matemáticas, filosofía, atletismo y otros. Amenazada por sus astronomía. Tal vez obtuvo segundos lugares en compe-

“herejías”, la gran biblioteca

tencias de atletismo o de lucha. Fue uno de los primeros

fue quemada y destruida por

bibliotecarios de la entonces biblioteca más importante del

completo. Los historiadores

mundo, el Mouseion, en Alejandría, Egipto, fundada por

no están seguros de quiénes

Ptolomeo II Sóter. Eratóstenes fue uno de los académicos

fueron los responsables, que

más destacados de su época y escribió sobre temas filosó-

con seguridad se guiaron por

ficos, científicos y literarios. Su reputación entre sus con-

la certeza de sus verdades.

temporáneos era inmensa: Arquímedes le dedicó un libro.

Estar absolutamente cierto, no tener dudas en absoluto,

Como matemático, inventó un método para encontrar es *certeza* la principal causa de mucha de la destrucción, números primos. Como geógrafo, midió la inclinación del

humana y de otra índole, en los siglos que siguieron.

eje de la Tierra con gran exactitud y escribió *Geografía,* el Eratóstenes no presenció la destrucción de su gran biblio-primer libro que dio a la geografía una base matemática y

teca, porque tuvo lugar después de su muerte.

que consideró a la Tierra como un globo dividido en lati-

En la actualidad, Eratóstenes es más recordado por su

tudes y en zonas frías, templadas y tórridas.

sorprendente cálculo del tamaño de la Tierra, hecho con

Las obras clásicas de la literatura griega se resguardaban

notable exactitud (hace 2,000 años, sin computadoras

en el Mouseion, que era anfitrión de numerosos académi-

ni satélites artificiales, sólo con el uso de buen razona-

cos y contenía cientos de miles de papiros y pergaminos.

miento, geometría y mediciones sencillas). En este capí-

Pero este tesoro humano no era apreciado por todos. tulo verás cómo logró esto.

1.1 Mediciones científicas

Las mediciones son una característica distintiva de la buena ciencia. Cuánto sabes de algo suele guardar relación con cuán bien puedes medirlo. Esto lo estableció muy bien el famoso físico lord Kelvin en el siglo XIX: “Con frecuencia digo que, cuando puedes medir algo y expresarlo en números, entonces lo conoces un poco. Cuando no puedes medirlo, cuando no puedes expresarlo en números, tu conocimiento es escaso e insatisfactorio.

Puede ser el comienzo del conocimiento, pero en tus razonamientos escasamente has avanzado a la etapa de la ciencia, cualquiera que esta sea”. Las mediciones científicas no son algo nuevo, sino que se remontan a tiempos antiguos. Por ejemplo, en el siglo III a.

C. se hicieron mediciones bastante exactas de los tamaños de la Tierra, la Luna y el Sol, así como de las distancias entre el os.

Cómo Eratóstenes midió el tamaño de la Tierra

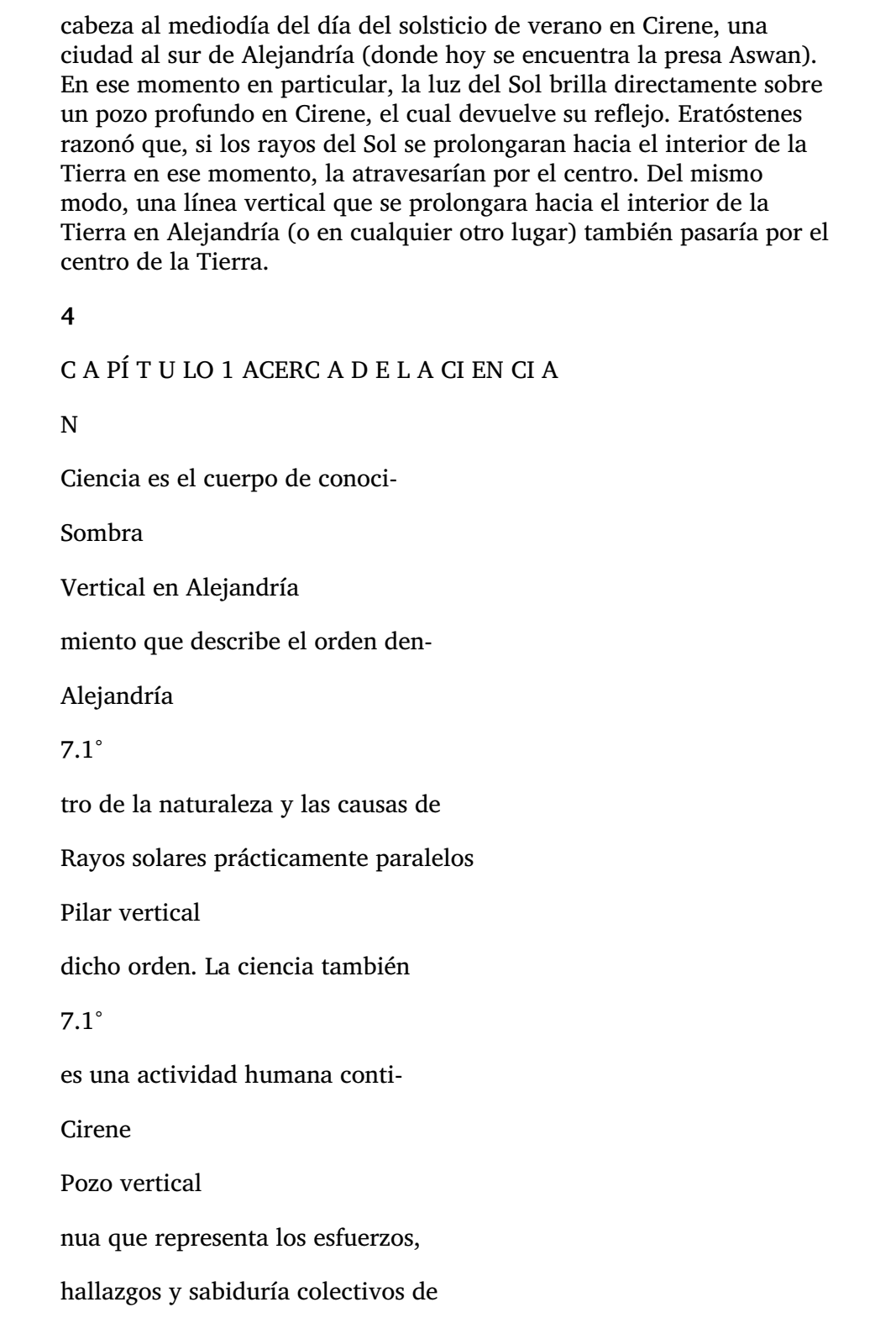
El tamaño de la Tierra se midió por primera vez en Egipto, y lo hizo Eratóstenes, aproximadamente en el 235 a. C. Calculó la circunferencia de la Tierra de la siguiente manera. Sabía que el Sol alcanzaba su altura máxima en el cielo al mediodía del solsticio de verano (que ocurre alrededor del 21 de junio en los calendarios actuales). En ese momento, un poste vertical proyecta su sombra más corta. Si el Sol está directamente arriba del poste, un poste vertical no proyecta ninguna sombra en absoluto. Gracias a la información de la biblioteca, Eratóstenes supo que el Sol estaba directamente sobre su

cabeza al mediodía del día del solsticio de verano en Cirene, una ciudad al sur de Alejandría (donde hoy se encuentra la presa Aswan). En ese momento en particular, la luz del Sol brilla directamente sobre un pozo profundo en Cirene, el cual devuelve su reflejo. Eratóstenes razonó que, si los rayos del Sol se prolongaran hacia el interior de la Tierra en ese momento, la atravesarían por el centro. Del mismo modo, una línea vertical que se prolongara hacia el interior de la Tierra en Alejandría (o en cualquier otro lugar) también pasaría por el centro de la Tierra.

Ciencia es el cuerpo de conoci-

miento que describe el orden den-

tro de la naturaleza y las causas de dicho orden. La ciencia también es una actividad humana continua que representa los esfuerzos, hallazgos y sabiduría colectivos de



la raza humana, una actividad que

se dedica a reunir conocimiento

sobre el mundo y a organizarlo

S

y condensarlo en leyes y teorías

F I G U R A 1 . 1

verificables. La ciencia tiene sus

Cuando el Sol está directamente arriba en Cirene, no está justo por arriba en Alejandría, que se inicios antes de la historia escrita,

encuentra a 800 km al norte. Cuando los rayos del Sol brillan directamente en un pozo vertical en cuando las personas descubrieron

Cirene, proyectan la sombra de un pilar vertical en Alejandría. Las verticales en ambas ubicaciones por primera vez las periodicida-se alargan hacia el centro de la Tierra, y forman el mismo ángulo que los rayos del Sol forman con des y relaciones en la naturaleza,

el pilar en Alejandría. Eratóstenes midió este ángulo en 1/50 de círculo completo. Por tanto, la como patrones de estrellas en el

distancia entre Alejandría y Cirene es 1/50 la circunferencia de la Tierra.

cielo nocturno y patrones de clima:

cuándo iniciaba la temporada

lluviosa o cuándo los días eran más

Al mediodía del 22 de junio, Eratóstenes midió la proyección de la sombra de un largos. Gracias a dichas periodici-pilar vertical en Alejandría y descubrió que medía 1/8 de la altura del pilar (Figura 1.1).

dades, las personas aprendieron

Esto corresponde a un ángulo de 7.18 entre los rayos del Sol y el pilar vertical. Dado que a realizar predicciones que les

dieron cierto control sobre sus

7.18 es 7.1/360, o aproximadamente 1/50 de círculo, Eratóstenes razonó que la distancia entornos.

entre Alejandría y Cirene debía de ser 1/50 la circunferencia de la Tierra. Por tanto, la La ciencia registró grandes

circunferencia de la Tierra se convierte en 50 veces la distancia entre estas dos ciudades.

adelantos en la Grecia de los siglos

Los agrimensores midieron esta distancia, bastante plana y recorrida con frecuencia, en IV y III a. C., y se extendió por el

aproximadamente 5,000 estadios (800 kilómetros). De modo que Eratóstenes calculó la mundo mediterráneo. El avance

circunferencia de la Tierra en 50 3 5,000 estadios 5 250,000 estadios. Esto se acerca científico llegó casi a detenerse en

mucho al valor aceptado en la actualidad para la circunferencia de la Tierra.

Europa con la caída del Imperio

Romano en el siglo V d. C. Hordas

El mismo resultado se obtiene si se pasan completamente por alto los grados y se de bárbaros destruyeron casi todo

compara la longitud de la sombra proyectada por el pilar con la altura del pilar. El ra-lo que encontraron a su paso

zonamiento geométrico muestra, con una buena aproximación, que la razón *longitud* cuando invadieron Europa. La

de sombra/altura de pilar es la misma que la razón *distancia entre Alejandría y Cirene/*

razón cedió su lugar a la religión,

radio de la Tierra. De modo que, como el pilar es ocho veces mayor que su sombra, el que condujo a Europa hacia las ti-radio de la Tierra debe ser ocho veces mayor que la distancia entre Alejandría y Cirene.

nieblas de la Edad Media. Durante

Dado que la circunferencia de un círculo es 2p veces su radio ($C = 2\text{p}$ r), el radio de esta época, los chinos y polinesios

elaboraban cartas estelares y pla-

la Tierra es simplemente su circunferencia dividida entre 2p. En unidades modernas, netarias, y las naciones árabes de-el radio de la Tierra mide 6,370 kilómetros y su circunferencia es 40,000 kilómetros.

sarrollaban matemáticas y apren-

dían sobre la producción de vidrio,

papel, metales y varios químicos.

Tamaño de la Luna

La ciencia griega se reintrodujo

Otro gran científico de la misma era fue Aristarco, quien probablemente fue el primero en Europa gracias a la influencia

en sugerir que la Tierra gira sobre su eje una vez al día, lo que explicaba el movimiento islámica que penetró en España

diario de las estrellas. También formuló la hipótesis de que la Tierra se mueve alrede-durante los siglos X, XI y XII. En el

dor del Sol en una órbita anual y que los demás planetas hacen lo mismo.1 Aristarco siglo XIII surgieron universidades

calculó de manera correcta el diámetro de la Luna y su distancia respecto de la Tierra.

en Europa, y la introducción de la

pólvora cambió la estructura social

Logró todo esto alrededor del año 240 a. C., 17 siglos antes de que sus hallazgos fueran y política de Europa en el siglo XIV.

aceptados por completo.

En el siglo XV, Leonardo da Vinci

mezcló bellamente el arte y la

ciencia. El pensamiento científico

1Aristarco no estaba seguro de su hipótesis heliocéntrica, quizá porque las estaciones desiguales de la Tierra se fomentó en el siglo XVI con el

parecían no sustentar la idea de que la Tierra forma círculos alrededor del Sol. Lo más importante es que se advenimiento de la imprenta.

observó que la distancia entre la Luna y la Tierra variaba, evidencia clara de que la Luna no forma círculos perfectos alrededor de la Tierra. Si la Luna no sigue una trayectoria circular alrededor de la Tierra, era difícil afirmar que la Tierra sigue una trayectoria circular alrededor del Sol. La explicación, las trayectorias elípticas de los planetas, no se descubrió sino hasta siglos después, y lo hizo Johannes Kepler. Mientras tanto, los epiciclos propuestos por otros astrónomos explicaban dichas discrepancias. Es interesante especular acerca del curso de la astronomía si la Luna no existiera. Su órbita irregular no habría contribuido al temprano descrédito de la teoría heliocéntrica, que acaso se hubiera afianzado siglos antes.

C A PÍ T U LO 1 ACERC A D E L A CI EN CI A

5

F I G U R A 1 . 2

Durante un eclipse lunar se observa que

Órbita de la Luna

la sombra de la Tierra es 2.5 veces más

ancha que el diámetro de la Luna. Debi-

do al gran tamaño del Sol, la sombra de

Rayos de luz procedentes

La sombra de la Tierra

la Tierra debe estrecharse para formar

La Luna durante

es 2.5 veces

un cono. La cantidad de conicidad es

La Tierra

del borde superior del Sol un eclipse solar

más ancha que la Luna

evidente durante un eclipse solar, donde

la sombra de la Luna forma un cono de

todo el diámetro lunar, desde la Luna

Cono de sombra

Rayos de luz procedentes

La Luna durante

hasta la Tierra. De modo que la sombra

de la Luna de 1 diámetro lunar

un eclipse lunar

de la Tierra forma un cono del mismo

del borde inferior del Sol

tamaño en la misma distancia. Por

tanto, el diámetro de la Tierra debe ser

3.5 diámetros lunares.

Al observar un eclipse de Luna, Aristarco comparó el tamaño de la Tierra con el tamaño de la Luna. La Tierra, como cualquier cuerpo en la luz solar, proyecta una sombra. Un eclipse de Luna es simplemente el evento en el que la Luna pasa por El astrónomo polaco del siglo XVI,

esta sombra. Aristarco estudió con mucho cuidado este evento y descubrió que el an-Nicolás Copérnico, causó gran con-

cho de la sombra de la Tierra sobre la Luna era 2.5 diámetros de Luna. Esto parecería troversia cuando publicó un libro

indicar que el diámetro de la Luna es 2.5 veces menor que el de la Tierra. Pero, debido que proponía que el Sol estaba

estacionario y que la Tierra giraba

al enorme tamaño del Sol, la sombra de la Tierra forma un cono, como se demuestra alrededor del Sol. Estas ideas

durante un eclipse solar. (La Figura 1.2 muestra esto en escala exagerada.) En ese mo-entraron en conflicto con la idea

mento, la Tierra intercepta la sombra de la Luna, pero apenas. El cono de la sombra de popular de que la Tierra era el cen-la Luna es casi un punto sobre la superficie terrestre, prueba de que el cono de la sombra tro del Universo. También entraron

de la Luna a esta distancia es un diámetro lunar. De modo que, durante un eclipse lu-en conflicto con las enseñanzas

nar, la sombra de la Tierra, que cubre la misma distancia, también debe formar un cono de la Iglesia y fueron prohibidas

de un diámetro lunar. Si se tiene en cuenta el cono de los rayos del Sol, el diámetro de la durante 200 años. El físico italiano

Galileo Galilei fue arrestado por

Tierra debe ser (2.5 1 1) veces el diámetro de la Luna. De esta forma, Aristarco mostró popularizar la teoría copernicana

que el diámetro de la Luna es 1/3.5 el de la Tierra. El diámetro actualmente aceptado de y por algunos descubrimientos as-la Luna es 3,640 km, que se encuentra dentro de 5% del valor calculado por Aristarco.

tronómicos propios. Sin embargo,

un siglo después, las ideas de Co-

pérnico y de Galileo se aceptaron

de manera generalizada.

Sol

Órbita de la Luna

Esta clase de ciclo ocurre época

tras época. A principios del siglo

Tierra

XIX, los geólogos sufrieron una

(muy pequeña para verse)

violenta condena porque disentían

F I G U R A 1 . 3

con el relato del Génesis acerca de

Escala correcta de eclipses solar y lunar, que muestra por qué un alineamiento perfecto de Sol, la creación. Más tarde, en el mismo

Luna y Tierra es tan poco frecuente. (Los eclipses incluso son menos frecuentes porque la órbita de siglo, se aceptó la geología, pero

la Luna está inclinada aproximadamente 5 respecto del plano en que se encuentra la órbita de la las teorías de la evolución fueron

Tierra alrededor del Sol.)

censuradas y se prohibió su ense-

ñanza. Cada época tiene sus gru-

pos de rebeldes intelectuales que

Distancia a la Luna

son desaprobados y en ocasiones

Pega con cinta una pequeña moneda a una ventana y obsérvala con un ojo de modo perseguidos en el momento, pero

que apenas bloquee la Luna llena. Esto ocurre cuando tu ojo está a una distancia que después parecen inofensivos

aproximada de 110 diámetros de moneda. Entonces, la razón de *diámetro de moneda/*

y con frecuencia esenciales para

distancia de la moneda es aproximadamente 1/110. El razonamiento geométrico deriva-la elevación de las condiciones

humanas. Como dijo sabiamente

do de los triángulos similares muestra que ésta también es la proporción entre *diámetro* el conde M. Maeterlinck: “en cada

de la Luna/distancia de la Luna (Figura 1.4). De modo que la distancia entre tú y la encrucijada del camino que condu-Luna es 110 veces el diámetro de la Luna. Los antiguos griegos lo sabían. La medición ce hacia el futuro, a cada espíritu

de Aristarco del diámetro de la Luna fue todo lo que se necesitó para calcular la dis-progresivo se oponen mil hombres

tancia Tierra-Luna. De manera que los antiguos griegos conocían tanto el tamaño de dispuestos a defender el pasado”.

la Luna como su distancia respecto de la Tierra.

Con esta información, Aristarco calculó la distancia Tierra-Sol.

Diámetro de la Luna

Diámetro de la moneda

Distancia respecto

Distancia respecto de la Luna

de la moneda

Diámetro de la moneda

Diámetro de la Luna

1

=

=

Distancia respecto de la moneda

Distancia respecto de la Luna

110

F I G U R A 1 . 4

Un ejercicio de proporciones. Cuando la moneda apenas “eclipsa” la Luna, la proporción entre diámetro de la moneda y distancia entre tú y la moneda es igual a la proporción entre diámetro de la Luna y distancia entre tú y la Luna (aquí no está a escala). Las mediciones

dan una cifra de 1/110

para ambas proporciones.

Distancia al Sol

Si repitieras el ejercicio de la moneda y la Luna con el Sol (lo que sería peligroso debido a la brillantez del Sol), adivina qué: la razón *diámetro del Sol/distancia al Sol* también es 1/110. Esto se debe a que los tamaños del Sol y la Luna son iguales al ojo. Ambos forman un cono con el mismo ángulo (aproximadamente 0.5). Sin embargo, si bien los antiguos griegos conocían la proporción entre diámetro y distancia, el diámetro solo o la distancia sola tenían que determinarse por otros medios. Aristarco descubrió un método para hacerlo. He aquí lo que hizo.

Aristarco observó la fase de la Luna cuando era *exactamente* media Luna, con el Sol todavía visible en el cielo. Entonces la luz solar debía caer sobre la Luna en ángulos rectos respecto de su línea de visión. Esto significaba que las líneas entre la Tierra y la Luna, entre la Tierra y el Sol, y entre la Luna y el Sol, forman un triángulo recto (Figura 1.5).

Una regla de trigonometría establece que, si conoces todos los ángulos en un triángulo recto, más la longitud de alguno de sus lados, puedes calcular la longitud de cualquier otro lado. Aristarco conocía la distancia entre la Tierra y la Luna. Al momento de la media Luna también conocía uno de los ángulos, 90. Todo lo que tuvo que hacer fue medir el segundo ángulo entre la línea de visión a la Luna y la línea de visión El Sol está directamente sobre

al Sol. Entonces, el tercer ángulo, uno muy pequeño, es 180 menos la suma de los dos tu cabeza a mediodía sólo en el

primeros ángulos (la suma de los ángulos en cualquier triángulo 5 180).

ecuador. Si estás de pie en la luz

Es difícil medir el ángulo entre las líneas de visión a la Luna y al Sol sin un tránsito solar en el ecuador, no proyectas

ninguna sombra. En ubicaciones

moderno. Por un lado, tanto el Sol como la Luna no son objetos puntuales, sino rela-más alejadas del ecuador, el Sol

tivamente grandes. Aristarco tenía que mirar hacia sus centros (o cualquier borde) y nunca está directo sobre tu cabeza

medir el ángulo intermedio, ¡bastante grande, casi un ángulo recto en sí mismo! Para a mediodía. Cuanto más lejos estés

los estándares de la época moderna, su medición fue muy imperfecta. Midió 87, en del ecuador, más larga será la som-tanto que el verdadero valor es 89.8. Pensó que el Sol estaba a aproximadamente 20

bra que proyecte tu cuerpo.

veces la distancia a la Luna, cuando de hecho está a aproximadamente 400 veces dicha distancia. De modo que, aunque su método era ingenioso, sus mediciones no fueron Media Luna

90°

X

Sol

SCREENCAST: Imágenes a través

Tierra

de orificios

F I G U R A 1 . 5

Cuando la Luna aparece exactamente como medio llena, Sol, Luna y Tierra forman un triángulo recto (no a escala). La hipotenusa es la distancia Tierra-Sol. Por simple trigonometría puedes encontrar la hipotenusa de un triángulo recto si conoces el tamaño de cualquier ángulo no recto y la longitud de un lado. La distancia Tierra-Luna es un lado de longitud conocida. Mide el ángulo *X*

y podrás calcular la distancia Tierra-Sol.

perfectas. Quizás a Aristarco se le hacía difícil creer que el Sol estuviera tan lejos, y erró en el lado más cercano. No se sabe.

En la actualidad se sabe que el Sol está a un promedio de 150,000,000 km de la *D*

Tierra. Está un poco más cerca de la Tierra en diciembre (147,000,000 km) y un poco más alejado en junio (152,000,000 km).

Tamaño del Sol

Una vez conocida la distancia al Sol, la razón diámetro/distancia de

1/110 permite medir el diámetro del Sol. Otra forma de medir la proporción 1/110, además del método de la Figura 1.4, es medir el diámetro de la imagen del Sol proyectada a través de una abertura minúscula. Deberías intentarlo. Pincha un agujero en una hoja de cartulina opaca y deja que la luz solar brille sobre él. La imagen redonda que se proyecta sobre la superficie que está abajo en realidad es una imagen del Sol. Verás que 150,000,000 km

el tamaño de la imagen no depende del tamaño del orificio sino, más bien, de cuán alejado esté el orificio de la imagen. Agujeros más grandes forman imágenes más brillantes, no más grandes. Desde luego, si el orificio es muy grande, no se forma ninguna imagen. Una medición cuidadosa mostrará que la proporción entre el tamaño de la imagen y la distancia que hay al orificio es 1/110, igual que la razón que hay entre *h*

el *diámetro del Sol y la distancia entre el Sol y la Tierra* (Figura 1.6).

Es interesante que en el momento de un eclipse solar parcial, la imagen proyectada *d*

por el orificio sea una forma creciente, la misma que la del Sol cubierto parcialmente.

$d =$

D

$= 1$

Ésta es otra forma de ver un eclipse parcial sin mirar al Sol.

h 150,000,000 km 110

¿Has notado que las manchas de la luz solar que ves en el suelo debajo de un árbol **F I G U R A 1. 6**

son perfectamente redondas cuando el Sol está justo arriba, y se extienden en forma de La mancha redonda de luz proyectada elipses cuando el Sol está bajo en el cielo? Se trata de imágenes del Sol que atraviesan por el orificio es una imagen del Sol.

agujeros pequeños, donde la luz brilla a través de aberturas en las hojas que son pe- Su razón *diámetro/distancia* es la misma queñas en comparación con la distancia que hay al suelo. Una mancha redonda de 10 que la razón *diámetro del Sol/distancia* centímetros de diámetro

se proyecta por una abertura que está a 110 3 10 cm arriba del *Tierra-Sol*, 1/110. El diámetro del Sol es suelo. Los árboles altos forman imágenes grandes; los árboles bajos forman imágenes 1/110 su distancia a la Tierra.

pequeñas. Y, en el momento de un eclipse solar parcial, las imágenes son crecientes (Figura 1.7).

F I G U R A 1 . 7

F I G U R A 1 . 8

Las manchas de luz solar con forma de

Renoir pintó con precisión las manchas de luz solar sobre la ropa y los alrededores de sus crecientes son imágenes del Sol cuando

sujetos: imágenes del Sol proyectadas por aberturas relativamente pequeñas formadas por las está parcialmente eclipsado.

hojas que están en lo alto.

Matemáticas: el lenguaje de la ciencia

La ciencia y las condiciones humanas avanzaron en forma espectacular después de que la ciencia y las matemáticas se integraron hace alrededor de cuatro siglos. Cuando las ideas de la ciencia se expresan en términos matemáticos, no tienen ambigüedades. Las ecuaciones de la ciencia ofrecen expresiones concisas de relaciones entre conceptos. No tienen los muchos significados que suelen causar confusión cuando se analizan las ideas expresadas en lenguaje común. Cuando los hal azgos en la naturaleza se expresan en términos matemáticos, son más fáciles de verificar o de desacreditar con experimentos. La estructura matemática de la física será evidente en las muchas ecuaciones que encontrarás a lo largo de este libro. Las ecuaciones son guías para el pensamiento que muestran las conexiones entre los conceptos de la naturaleza. Los métodos de las matemáticas y la experimentación condujeron a un enorme éxito en la ciencia.2

1.2 Métodos científicos

No existe *el* método científico. Pero sí hay características comunes en

la manera como los científicos hacen su trabajo. Todas éstas se remontan a los tiempos del físico italiano Galileo Galilei (1564-1642) y del filósofo inglés Francis Bacon (1561-1626). Ellos se desvincularon de los métodos de los griegos, quienes trabajaron "hacia arriba o hacia abajo", de acuerdo con las circunstancias, y llegaron a conclusiones acerca del mundo físico con un razonamiento basado en suposiciones arbitrarias (axiomas). El científico moderno trabaja "hacia arriba": primero examina la forma como funciona realmente el mundo y luego construye una estructura que explique los hallazgos.

Si bien no hay una sola descripción del **método científico** que sea realmente adecuada, es probable que se observen algunos o todos estos pasos en la manera como la mayoría de los científicos realiza su trabajo.

La ciencia es una forma de conocer

1. Reconocer una pregunta o un acertijo, como un hecho inexplicado.

el mundo y darle sentido.

2. Formular una conjetura educada, una **hipótesis**, que pueda resolver el acertijo.

3. Predecir las consecuencias de la hipótesis.

4. Realizar experimentos o cálculos para poner a prueba las predicciones.

5. Formular la regla general más simple que organiza los tres ingredientes principales: hipótesis, efectos predichos y hallazgos experimentales.

Aunque estos pasos son interesantes, gran parte del progreso en la ciencia ha prove-nido del ensayo y error, experimentaciones sin hipótesis o sólo simples descubrimientos accidentales de una mente bien preparada. El éxito de la ciencia descansa más en una actitud que comparten los científicos que en un método particular. Esta **actitud científica** es de análisis, integridad y humildad, es decir, la voluntad de admitir errores.

La actitud científica

Suele pensarse que un hecho es algo que no cambia y es absoluto. Pero, en ciencia, un **hecho**, por lo general, es un acuerdo estricto entre observadores competentes que hacen una serie de observaciones

acerca del mismo fenómeno. Por ejemplo, aunque alguna vez era un hecho que el universo era invariable y permanente, en la actualidad es un hecho que el universo se expande y evoluciona. Una hipótesis científica, por otra parte, es una conjetura informada que sólo se presume factual hasta que se respalda con experimentos. Cuando una hipótesis se pone a prueba una y otra vez y no se contradice, puede llegar a conocerse como **ley** o *principio*.

2 Hay una diferencia entre la estructura matemática de la física y la práctica de la resolución de problemas matemáticos: el enfoque de la mayoría de los cursos no conceptuales. Observa el número relativamente pequeño de problemas al final de los capítulos de este libro, comparados con el número de ejercicios. La atención se centra en la comprensión cómodamente antes del cálculo. En el libro auxiliar *Resolución de problemas de física conceptual* hay problemas adicionales.

Si un científico encuentra evidencias que contradicen una hipótesis, ley o principio, entonces, en el espíritu científico, tiene que cambiarse o abandonarse, sin importar la reputación o autoridad de las personas que la defiendan (a menos que la evidencia contradictoria, al ponerse a prueba, resulte estar equivocada. . lo que a veces ocurre). Por ejemplo, el enormemente respetado filósofo griego Aristóteles (384-322 a. C.) afirmó que un objeto cae con una rapidez proporcional a su peso. Esta idea se sostuvo como válida durante casi 2,000 años, debido a la decisiva autoridad de Aristóteles. Se dice que Galileo mostró la falsedad de la afirmación de Aristóteles con un experimento: demostró que los objetos pesados y ligeros soltados desde la torre inclinada de Pisa caían casi con la misma rapidez.

En el espíritu científico, un solo experimento verificable que pruebe lo contrario supera a cualquier autoridad, sin importar la reputación o el número de seguidores o defensores. En la ciencia moderna, el argumento por apelación a la autoridad tiene poco valor.3

Los científicos tienen que aceptar sus hal azgos experimentales aun cuando les gustaría que fueran diferentes. Deben luchar por distinguir entre lo que ven y lo que quieren ver, porque los científicos, al igual que toda la gente, tienen una gran capacidad para enga-ñarse.4 Las personas siempre han tendido a adoptar reglas generales, creencias, credos, ideas e hipótesis sin cuestionar a fondo su validez, y a conservarlas mucho tiempo después de que se ha demostrado que no

tienen sentido, son falsas o al menos cuestionables. Las suposiciones más generalizadas suelen ser las menos cuestionadas. Es muy frecuente que, cuando se adopta una idea, se preste atención particular a casos que parecen sustentarla, al tiempo que se distorsionan, minimizan o ignoran los casos que parecen refutarla.

Los científicos usan la palabra *teoría* en una forma que difiere de su uso en el habla cotidiana. En el habla cotidiana, una teoría no es diferente de una hipótesis: una suposición que no se ha verificado. Una **teoría** científica, por otra parte, es una síntesis de un gran cuerpo de información que abarca hipótesis bien comprobadas y verificadas acerca de ciertos aspectos del mundo natural. Los físicos, por ejemplo, hablan de la teoría de quarks del núcleo atómico, los químicos hablan de la teoría de los enlaces metálicos en los metales y los biólogos hablan de la teoría celular.

Las teorías de la ciencia no son fijas; más bien, experimentan cambios. Las teorías científicas evolucionan conforme pasan por etapas de redefinición y refinamiento.

Durante los pasados cientos de años, por ejemplo, la teoría del átomo se ha ido perfec-cionando de manera repetida a medida que se recopilan nuevos datos sobre el comportamiento atómico. De igual modo, los químicos han perfeccionado sus ideas sobre la manera como se enlazan las moléculas y los biólogos han perfeccionado la teoría celular. El perfeccionamiento de las teorías es una fortaleza de la ciencia, no una debilidad. Muchas personas piensan que cambiar de opinión es una señal de debilidad. Los científicos competentes deben ser expertos en cambiar de opinión. Sin embargo, sólo cambian de opinión cuando se confrontan con evidencia experimental sólida o cuando una hipótesis conceptualmente más simple los obliga a adoptar un nuevo punto de vis-Los experimentos, no la discusión

ta. Más importante que defender las creencias es mejorarlas. Quienes son honestos ante filosófica, deciden qué es correcto

en ciencia.

la evidencia experimental formulan las mejores hipótesis.

Lejos de su profesión, los científicos no son intrínsecamente más honestos o éticos que la mayoría de las personas. Pero en su profesión trabajan en un terreno que valora mucho la honestidad. La regla cardinal en ciencia es que todas las hipótesis deben ser verificables: deben ser susceptibles, al menos en principio, de demostrarse que son

equivocadas. En ciencia, es más importante que haya un medio de probar que una idea es errónea, que un medio para probar que es correcta. Éste es un factor principal que distingue a la ciencia de la no ciencia. Al principio esto puede parecer extraño, porque cuando uno se pregunta acerca de la mayoría de las cosas, uno se preocupa por las formas de descubrir si son verdaderas. Las hipótesis científicas son diferentes. De hecho, 3Pero apelar a la *belleza* tiene valor en ciencia. Más de un resultado experimental en tiempos modernos ha contradicho una teoría magnífica que, al someterse a mayor investigación, resultó estar equivocada. Esto refuerza la fe de los científicos en que, a final de cuentas, la descripción correcta de la naturaleza involucra concisión de la expresión y economía de conceptos, una combinación que merece llamarse bella.

4En tu formación académica no es suficiente estar atento a que otras personas puedan tratar de engañarte; es más importante estar atento a tu propia tendencia a engañarte a ti mismo.

si quieres distinguir si una hipótesis es científica o no, revisa si hay una prueba que demuestre que está equivocada. Si no hay una prueba de su posible falsedad, entonces la hipótesis no es científica. Albert Einstein lo planteó bien cuando afirmó: “ningún número de experimentos puede demostrar que estoy en lo correcto; un solo experimento puede demostrar que estoy equivocado”.

Considera la hipótesis del biólogo Charles Darwin de que las formas de vida evolucionaron de las formas más simples a las más complejas. Podría demostrarse que esta hipótesis es incorrecta si los paleontólogos descubrieran que las formas más complejas de vida aparecieron antes que sus contrapartes más simples. Einstein formuló la hipótesis de que la luz se dobla por la gravedad. Podría demostrarse que esto es erróneo si la luz de las estrellas que roza el Sol y puede verse durante un eclipse solar no se desviara de su trayectoria normal. Como resultó ser, las formas de vida menos complejas anteceden a sus contrapartes más complejas y la luz de las estrellas se dobla cuando pasa cerca del Sol, lo que sustenta las afirmaciones. Si en algún momento una hipótesis o afirmación científica se confirma, entonces ésta se considera útil y constituye un peldaño más en la construcción de conocimiento adicional.

Considera la hipótesis que afirma que “la alineación de los planetas en el cielo determina el mejor momento para tomar decisiones”. Muchas personas lo creen, pero esta hipótesis no es científica. No se puede demostrar que es equivocada, ni se puede La esencia de la ciencia se expresa

demostrar que es correcta. Es *especulación.* Del mismo modo, la hipótesis que dice que en dos preguntas: ¿de qué manera

se podría obtener conocimiento?

“en otros planetas en alguna parte del universo existe vida inteligente” no es científi-y ¿qué evidencia demostraría que

ca. Aunque puede demostrarse que es correcta si se verifica un solo ejemplo de vida esta idea está equivocada? Las

inteligente existente en alguna parte del universo, no hay forma de demostrar que es afirmaciones sin evidencia no son

equivocada si no se encuentra vida inteligente jamás. Si se buscara en lo más profundo científicas y pueden desecharse sin

del universo durante eones y no se encontrara vida, eso no probaría

que no existe “a evidencia.

la vuelta de la esquina”. Por otra parte, la hipótesis que afirma que “no hay otra vida inteligente en el universo” *es* científica. ¿Ves por qué?

Una hipótesis que puede demostrarse que es correcta pero que no puede demostrarse que es incorrecta no es una hipótesis científica. Muchos de estos enunciados son bastante razonables y útiles, pero se encuentran fuera del dominio de la ciencia.

Ser científico es estar abierto a

P U N T O D E C O N T R O L

nuevo conocimiento.

¿Cuál de las siguientes es una hipótesis científica?

a. Los átomos son las partículas de materia más pequeñas que existen.

b. El espacio está permeado con una esencia que es indetectable.

c. Albert Einstein fue el físico más grandioso del siglo XX.

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Sólo el enunciado *a* es científico, porque hay una prueba de su falsedad. El enunciado no sólo *puede demostrarse* que es equivocado, sino que, de hecho, *se ha* demostrado que es equivocado. El enunciado *b* no tiene prueba de su posible falsedad y, por tanto, no es científico. Sucede lo mismo con cualquier principio o concepto para el cual no haya medios, procedimientos o pruebas mediante los cuales pueda demostrarse que es equivocado (si es que está equivocado). Algunos pseudocientíficos y otros farsantes del conocimiento incluso ni siquiera tendrán en cuenta una prueba de la posible falsedad de sus enunciados. El enunciado *c* es una afirmación que no tiene prueba de su posible falsedad. Si Einstein no fue el físico más grandioso, ¿cómo podrías saberlo? Es importante observar que, dado que el nombre Einstein por lo general se tiene en alta estima, es un favorito de los pseudocientíficos. De modo que no debe sorprenderte que el nombre de Einstein, como el de Jesús o el de cualquiera otra persona muy respetada, sea citado con frecuencia por charlatanes que quieren ganarse el respeto de los demás hacia su persona y hacia sus puntos de vista. En todos los campos es prudente ser escéptico de quienes desean

ganar reconocimiento apelando a la autoridad de otros.

C A PÍ T U LO 1 ACERC A D E L A CI EN CI A

11

Nadie tiene el tiempo, la energía o los recursos para poner a prueba cada idea, de modo que la mayor parte del tiempo uno cree en la palabra de alguien más. ¿Cómo sabes a quién creerle? Para reducir la probabilidad de error, los científicos sólo creen Se puede aprender mucho cuando

en la palabra de aquellos cuyas ideas, teorías y hallazgos son verificables, si no en la se plantean preguntas. Sócrates

práctica, al menos en principio. Las especulaciones que no se pueden poner a prueba se predicó esto, y de ahí surgió el

consideran como “no científicas”. En el largo plazo, esto obliga a que haya honestidad: método socrático. El planteamien-los hallazgos ampliamente divulgados entre los colegas científicos por lo general se to de preguntas ha conducido a

algunas de las obras más magnífi-

sujetan a una mayor cantidad de pruebas. Tarde o temprano se encuentran los errores cas del arte y la ciencia.

(y las falacias); se exponen las vanas ilusiones. Un científico

desacreditado no consigue una segunda oportunidad en la comunidad de científicos. El castigo por fraude es la excomunión profesional. En consecuencia, la honestidad, tan importante para el avance de la ciencia, se vuelve materia de interés propio para los científicos. Existe relativamente poca fanfarronería en un juego en el que se apuesta todo. En los campos de estudio donde lo correcto y lo incorrecto no se establecen con tanta facilidad, la presión por ser honesto es mucho menor.

Las ideas y conceptos más importantes para la vida diaria con frecuencia no son de carácter científico; su exactitud o inexactitud no pueden determinarse en el laboratorio. Resulta muy interesante que parece que las personas creen honestamente que sus propias ideas acerca de las cosas son correctas, y casi todos tienen amistad con personas que sostienen visiones completamente opuestas, de modo que las ideas de alguno de ellos (o de todos) deben ser incorrectas. ¿Cómo sabes si *tú* eres, o no, uno de los que tienen creencias erróneas? Existe una prueba. Antes de estar razonablemente convencido de que estás en lo correcto acerca de una idea particular, debes estar seguro de que entiendes las objeciones y las posiciones de tus antagonistas más elocuentes. Debes descubrir si tus opiniones están respaldadas por un conocimiento sólido formado por ideas opuestas o por tus *malas interpretaciones* acerca de las ideas contrarias. Para hacer esta distinción ve si puedes exponer las objeciones y posiciones de tus oponentes de modo que sean satisfactorias para *ellos*. Incluso si logras hacerlo, no puedes estar absolutamente seguro de estar en lo correcto acerca de tus propias ideas, pero la probabilidad de estar en lo correcto es considerablemente mayor si pasas esta prueba.

P U N T O D E C O N T R O L

Supón que, en un desacuerdo entre dos amigos, A y B, observas que el Cada quién necesita un filtro de

amigo A sólo enuncia y vuelve a enunciar un solo punto de vista, en tanto conocimiento para decir la diferen-que el amigo B expone con claridad tanto su propia posición como la del cia entre lo que es válido y lo que

sólo pretende ser válido. El mejor

amigo A. ¿Quién es más probable que tenga la razón? *(¡Piensa antes de*

filtro de conocimiento jamás inven-

leer la respuesta abajo!)

tado es la ciencia.

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

¿Quién puede saberlo? Quizás el amigo B tenga la agudeza de un abogado que puede expresar varios puntos de vista y aun así estar equivocado. No puedes estar seguro acerca del "otro chico". La prueba de corrección o incorrección aquí sugerida no es una prueba de los demás, sino es una prueba de ti y para *ti.* Puede ayudar a tu desarrollo personal. Cuando intentes articular las ideas de tus antagonistas, debes estar preparado, como los científicos que están preparados para cambiar de opinión, para descubrir evidencia contraria a tus propias ideas, evidencia que puede alterar tus opiniones. El crecimiento intelectual suele ocurrir de esta manera.

Si bien la noción de estar familiarizado con los puntos de vista contrarios parece razonable para la mayoría de la gente pensante, es precisamente lo opuesto (blindarse a uno mismo y a los demás contra las ideas contrarias) lo que se ha practicado más ampliamente. A uno se le enseña a desacreditar las ideas impopulares sin comprenderlas en el contexto adecuado. Con la visión retrospectiva 20/20 se puede ver que muchas

de las "verdades profundas" que fueron las piedras angulares de civilizaciones enteras fueron reflejos superficiales de la ignorancia prevaleciente de la época. Muchos de los problemas que plagaron las sociedades surgieron de esta ignorancia y de las malas interpretaciones resultantes; gran parte de lo que se sostuvo como cierto simplemente no lo era. Esto no está confinado al pasado. Todo adelanto científico es por necesidad incompleto y parcialmente inexacto, pues el descubridor lo ve con las anteojeras que se usan en el momento y sólo puede deshacerse de una parte de dicho obstáculo.

1.3 Ciencia, arte y religión

La búsqueda de orden y significado en el mundo circundante ha asumido diferentes formas: una es la ciencia, otra es el arte y otra es la religión. Aunque las raíces de las tres se remontan a miles de años atrás, las tradiciones de la ciencia son relativamente recientes. Lo más importante es que los dominios de la ciencia, el arte y la religión El

arte trata sobre la belleza

cósmica. La ciencia tiene que ver

son diferentes, aunque con frecuencia se traslapan. La ciencia tiene que ver, principal-con el orden cósmico. La religión

mente, con el descubrimiento y el registro de fenómenos naturales, las artes se ocupan se ocupa del propósito cósmico.

de la interpretación personal y la expresión creativa, y la religión aborda la fuente, el propósito y el significado de todo ello.

La ciencia y las artes son similares. En el arte de la literatura uno descubre lo que es posible en la experiencia humana. Uno puede aprender sobre las emociones, desde la ira hasta el amor, incluso si no se han experimentado. Las artes no necesariamente brindan dichas experiencias, pero las describen y sugieren qué puede ser posible para uno. La ciencia dice lo que es posible en la naturaleza. El conocimiento científico ayuda a predecir posibilidades en la naturaleza incluso antes de que dichas posibilidades se hayan experimentado. Ofrece una forma de conectar las cosas, de ver las relaciones entre ellas y de dar sentido a la gran variedad de eventos naturales a tu alrededor. La ciencia amplía la perspectiva de la naturaleza. Un conocimiento tanto de las artes como de las ciencias genera una totalidad que repercute en la manera de ver el mundo y las decisiones que se toman acerca del mundo y de uno mismo. Una persona verdaderamente culta tiene conocimientos tanto del arte como de las ciencias.

La ciencia y la religión también tienen similitudes, pero en esencia son diferentes, principalmente debido a que sus dominios son distintos. El dominio de la ciencia es el orden natural; el dominio de la religión es el propósito de la naturaleza. Las creencias y prácticas religiosas, por lo general, implican la fe en un ser supremo, y su adoración, además de la creación de la comunidad humana, no las prácticas de la ciencia. En este aspecto, ciencia y religión son tan diferentes como manzanas y naranjas: son dos campos diferentes de la actividad humana, aunque complementarios.

Cuando se estudie la naturaleza de la luz más adelante en este libro, primero se tratará la luz como una onda y luego como una partícula. Para la persona que sepa un poco de ciencia, las ondas y las partículas son conceptos contradictorios; la luz sólo puede ser una u otra, y uno tiene que elegir entre ellas. Pero para la persona culta, ondas y

partículas se complementan mutuamente y ofrecen una comprensión más profunda de la luz. En forma similar, son principalmente las personas que no están La convicción de que sólo hay

informadas, o que están mal informadas, sobre la naturaleza más profunda tanto de una verdad, y de que uno está

la ciencia como de la religión, quienes creen que deben elegir entre creer en la religión en posesión de dicha verdad,

o creer en la ciencia. A menos que uno tenga una comprensión superficial de una de me parece la raíz más profunda

de toda la maldad que hay en el

ellas o de ambas, no existe una contradicción en ser religioso y ser científico en el mundo.– *Max Born*

pensamiento propio.5

Muchas personas se preocupan por no conocer las respuestas a preguntas religiosas y filosóficas. Para evitar la incertidumbre, algunas aceptan sin reservas casi cualquier respuesta cómoda. Sin embargo, un mensaje importante en la ciencia es que la incertidumbre es aceptable. Por ejemplo, en el Capítulo 31 aprenderás que no es posible 5Desde luego, esto no se aplica a los extremistas religiosos que con tenacidad afirman que uno no puede abrazar su tipo de religión y la ciencia al mismo tiempo.

C A PÍ T U LO 1 ACERC A D E L A CI EN CI A

13

PSEUDOCIENCIA

En épocas pre-científicas, cualquier intento por aprovechar la comparación, determinar por medios científicos el sexo de los naturaleza significaba forzar a la naturaleza contra ella misma.

bebés que aún no nacen arroja una tasa de éxito de 95% si se

La naturaleza tenía que subyugarse, por lo general con

utilizan sonogramas, y de 100% con amniocentesis. Lo mejor

alguna forma de magia o por medios que estuvieran por arriba de la

que se puede decir del chamán es que su tasa de éxito de 50% es

naturaleza, es decir, sobrenaturales. La ciencia hace exactamente lo

mucho mejor que la de los astrólogos, lectores de manos u otros

contrario y trabaja dentro de las leyes de la naturaleza. Los métodos
pseudocientíficos que predicen el futuro.

de la ciencia han desplazado en gran medida la dependencia en lo

Un ejemplo de pseudociencia que tiene cero éxito lo constituyen

sobrenatural, más no por completo. Las antiguas formas persisten,

las máquinas multiplicadoras de energía. Dichas máquinas, que

con plena fuerza en las llamadas culturas primitivas, y también

se alega suministran más energía de la que toman, están, según se

sobreviven en las culturas tecnológicamente avanzadas, en ocasiones

dice, “todavía en las mesas de diseño y necesitan fondos para su

disfrazadas como ciencia. Esto es ciencia falsa: **pseudociencia**. La
desarrollo”. Las ofrecen charlatanes que venden acciones a un

marca distintiva de la pseudociencia es que carece de los ingredientes
público ignorante que sucumbe a los castillos en el aire y a las

esenciales de la evidencia y no tiene una prueba para saber qué es

promesas de éxito. Ésta es ciencia basura. Los pseudocientíficos

incorrecto. En el reino de la pseudociencia, el escepticismo y las

están en todas partes, por lo general, son muy buenos en reclutar

pruebas de la posible incorrección se minimizan o ignoran por

aprendices para obtener dinero o mano de obra, y pueden ser muy

completo.

convincentes incluso para personas aparentemente razonables. Sus

Hay muchas formas de ver las relaciones causa y efecto en

libros sobrepasan enormemente en número a los libros de ciencia en el universo. El misticismo es una de ellas, apropiada acaso en la las librerías. La ciencia basura prolifera.

religión más no aplicable a la ciencia. La astrología es un antiguo Hace cuatro siglos, la mayoría de los seres humanos estaban sistema de creencias que supone una correspondencia mística dominados por la superstición, diablos, demonios, enfermedades entre los individuos y el universo como totalidad: que los asuntos y magia en sus breves y difíciles vidas. La vida era cruel en la época humanos están influidos por las posiciones y los movimientos medieval. Sólo gracias a un enorme esfuerzo, los seres humanos de los planetas y otros cuerpos celestes. Esta visión no científica consiguieron el conocimiento científico, desterraron la superstición puede ser muy atractiva. Por muy insignificante que pueda uno y se libraron de la ignorancia. La humanidad debe regocijarse de sentirse a veces, los astrólogos aseguran que uno está íntimamente lo que ha aprendido: ya no se tiene que morir siempre que una conectado con el funcionamiento del cosmos, que fue creado para enfermedad infecciosa aparezca ni vivir con temor a los demonios. los seres humanos, en particular para aquellos que pertenecen En la actualidad, no es necesario afirmar que la superstición no es a la propia tribu, comunidad o grupo religioso. La astrología otra cosa que simple superstición, o que las nociones basura no son como magia antigua es una cosa, pero la astrología disfrazada de más que nociones basura, ya sea que las proclamen charlatanes en

ciencia es otra. Cuando se coloca como ciencia relacionada con las esquinas de las calles, pensadores inexactos que escriben libros la astronomía, entonces se convierte en pseudociencia. Algunos de salud con grandes promesas, mercachifles que venden terapia astrólogos presentan sus artes con un disfraz científico. Cuando usan magnética o demagogos que infligen temor.

información astronómica actualizada y computadoras que elaboran Sin embargo, es causa de alarma el que las supersticiones, la gráfica de los movimientos de los cuerpos celestes, los astrólogos que en alguna ocasión la gente luchó por erradicar, regresen con actúan en el reino de la ciencia. Pero cuando usan dichos datos para fuerza y encanten a un creciente número de personas. Ahora hay elucubrar revelaciones astrológicas, cruzan hacia la pseudociencia muchos miles de practicantes de astrología en Estados Unidos hecha y derecha.

que atienden a millones de seguidores crédulos. Un mayor La pseudociencia, al igual que la ciencia, hace predicciones. Las porcentaje de estadounidenses cree hoy en la astrología y los predicciones de un zahorí, que localiza agua subterránea con una fenómenos ocultos que los ciudadanos de la Europa medieval. varita de radiestesia, tienen una tasa de éxito muy alta, casi de 100%. Pocos periódicos imprimen una columna diaria de ciencia, pero Siempre que un zahorí realiza su ritual y apunta hacia un punto casi todos publican horóscopos diarios. Si bien los productos y los en el suelo, el que excava el pozo está seguro de encontrar agua.

medicamentos han mejorado con los adelantos científicos, no ha

La radiestesia funciona. Desde luego, el zahorí difícilmente puede

sucedido lo mismo con el pensamiento humano.

errar, porque hay agua subterránea dentro de los 100 metros bajo la

Muchos creen que la condición humana se desliza en reversa

superficie en casi todo punto sobre la Tierra. (¡La verdadera prueba

debido a la tecnología creciente. Sin embargo, es más probable

de un zahorí sería encontrar un lugar donde no hubiera agua!)

que la humanidad se deslice hacia atrás porque la ciencia y la

Un chamán que estudia las oscilaciones de un péndulo

tecnología se sometan a la irracionalidad, las supersticiones y

suspendido sobre el abdomen de una mujer embarazada puede

la demagogia del pasado. A la irracionalidad se asignará “igual

predecir el sexo del feto con una exactitud de 50%. Esto significa

tiempo” en los salones de clase. Cuidado con los voceros de la

que, si prueba su magia muchas veces en muchos fetos, la mitad de

irracionalidad. La pseudociencia y la irracionalidad son negocios

sus predicciones serán correctas y la otra mitad serán incorrectas, lo
inmensos y lucrativos.

que corresponde a la previsibilidad de una adivinanza cualquiera. En

conocer con certeza ni la cantidad de movimiento ni la posición de un
electrón en un átomo. Cuanto más sabes de uno, menos puedes saber
del otro. La incertidumbre es una parte del proceso científico. Está
bien no conocer las respuestas a preguntas fundamentales. ¿Por qué
las manzanas son atraídas gravitacionalmente a la Tierra?

¿Por qué los electrones se repelen mutuamente? ¿Por qué los imanes interactúan con otros imanes? ¿Por qué la energía tiene masa? En el nivel más profundo, los científicos no conocen las respuestas a dichas preguntas. . al menos no todavía. Se sabe mucho acerca de dónde estamos, pero realmente nada acerca de *por qué* estamos. Está bien no conocer las respuestas a tales preguntas religiosas. Ante la opción de una mente cerrada con respuestas cómodas y una mente abierta y exploradora sin respuestas, la mayoría de los científicos elige la última. Los científicos en general están cómodos con no saber.

1.4 Ciencia y tecnología

Ciencia y tecnología también son diferentes entre sí. A la ciencia le interesa recopilar conocimiento y organizarlo. La tecnología es ciencia aplicada, que utilizan los tecnólogos e ingenieros para propósitos prácticos. También ofrece las herramientas que necesitan los científicos en sus exploraciones ulteriores.

La tecnología es un arma de doble filo que puede ser tanto útil como dañina. Se tiene la tecnología, por ejemplo, para extraer combustibles fósiles del suelo y luego quemar los combustibles fósiles para producir energía. La producción de energía con combustibles fósiles ha beneficiado a la sociedad de innumerables maneras. Por el otro lado, la quema de combustibles fósiles pone en peligro al ambiente. Es tentador culpar a la propia tecnología de problemas como la contaminación, el agotamiento de recursos e incluso la sobrepoblación. Sin embargo, dichos problemas no son culpa de la tecnología, más **VALORACIÓN DEL RIESGO**

Los numerosos beneficios de la tecnología se acompañan de los productos de combustión cuando los combustibles fósiles riesgos. Cuando se ve que los beneficios de una innovación

impulsaron por primera vez el progreso industrial. En la actualidad,

tecnológica sobrepasan sus riesgos, la tecnología se acepta y se

es crucial conocer los riesgos de la tecnología tanto a corto como a

aplica. Los rayos X, por ejemplo, siguen usándose para diagnósticos

largo plazos.

médicos a pesar de su potencial para causar cáncer. Pero cuando se

Las personas parecen tener dificultades para aceptar que es

percibe que los riesgos de una tecnología superan sus beneficios, ésta imposible que exista el riesgo cero. Los aviones no pueden hacerse

debe usarse muy pocas veces o nunca.

perfectamente seguros. Los alimentos procesados no pueden

El riesgo puede variar con los diferentes grupos. La aspirina

producirse sin toxicidad alguna, pues todos los alimentos son

(ácido acetilsalicílico) es útil para los adultos, pero en los niños

tóxicos en cierto grado. Tú no puedes evitar la radiactividad,

pequeños puede causar una enfermedad potencialmente mortal

porque está en el aire que respiras y los alimentos que ingieres, y

conocida como *síndrome de Reye.* Desechar aguas negras en los ríos ha sido así desde antes de que los seres humanos caminaran por

locales puede plantear poco riesgo para una ciudad ubicada río

primera vez sobre la Tierra. Incluso la lluvia más limpia contiene

arriba, pero para los poblados ubicados río abajo las aguas negras

carbono 14 radiactivo, por no mencionar el mismo en el cuerpo.

no tratadas son un riesgo de salud. De igual modo, almacenar

Entre cada latido cardiaco en cada cuerpo humano, siempre hay

desechos radiactivos en el subsuelo puede plantear poco riesgo para

alrededor de 10,000 decaimientos radiactivos que ocurren de

el mundo actual, pero para las generaciones futuras el riesgo de tal

manera natural. Uno podrá esconderse en las colinas, comer los

almacenamiento es mayor si hay fugas hacia las aguas subterráneas.

alimentos más naturales, practicar higiene obsesiva y aun así morir

Las tecnologías que involucran diferentes riesgos para distintas

de cáncer causado por la radiactividad que emana del propio
personas, así como diferentes beneficios, plantean preguntas que con
cuerpo. La probabilidad de morir algún día es de 100%. Nadie
frecuencia son motivo de debates acalorados. ¿Cuáles medicamentos
está exento.
deben venderse al público general sin receta médica y cómo deben
La ciencia ayuda a determinar lo más probable. A medida que
etiquetarse? ¿Deben irradiarse los alimentos con la finalidad de
mejoran las herramientas de la ciencia, la valoración de lo más
acabar con la intoxicación por alimentos, lo cual mata a más de
probable se acerca más a dar en el blanco. La aceptación del riesgo,
5,000 estadounidenses cada año? Cuando se deciden políticas
por otra parte, es un tema social. Hacer del riesgo cero una meta
públicas, deben considerarse los riesgos para todos los integrantes de
social consumiría los recursos económicos presentes y futuros.
la sociedad.
¿No sería más noble aceptar un riesgo que no fuera cero y reducir
Los riesgos de la tecnología no siempre son evidentes de
al mínimo el riesgo dentro de los límites de la viabilidad? Una
forma inmediata. Nadie percibió por completo los peligros de
sociedad que no acepta riesgos no recibe beneficios.

que la lesión de una arma es culpa del arma. Son los seres humanos quienes utilizan la tecnología, quienes son responsables de cómo se usa.

Vale la pena remarcar que ya se cuenta con la tecnología para resolver muchos problemas ambientales. Este siglo xxi está siendo testigo del cambio de los combustibles fósiles a fuentes de energía más sustentables, como la fotovoltaica, la generación de electricidad térmica solar y la conversión de biomasa. Mientras que el papel donde se imprime este libro proviene de los árboles, el papel pronto provendrá de hierbas de rápido crecimiento, y cada vez se necesitará menos conforme las pantallas electrónicas ganen popularidad. Cada vez se reciclan más productos de desecho. En algunas partes del mundo se han logrado avances en el control de la explosión demográfica que agrava casi todos los problemas que enfrentan los seres humanos en la actualidad. La humanidad vive en un planeta

finito y cada vez más personas reconocen la capacidad de soporte de población de la Tierra. El mayor obstáculo para resolver los problemas de hoy se encuentra más en la inercia social que en la falta de tecnología. La tecnología es la herramienta. Lo que se haga con esta herramienta es responsabilidad de cada uno. La promesa de la tecnología Ninguna guerra se pelea por la

ciencia.

es un mundo más limpio y sano. Las aplicaciones sabias de la tecnología *pueden* conducir a un mundo mejor.

1.5 Física: la ciencia básica

La ciencia, que alguna vez fue llamada *filosofía natural,* abarca el estudio de las cosas vivas y de las no vivas, las ciencias de la vida y las ciencias físicas. Las ciencias de la vida incluyen biología, zoología y botánica. Las ciencias físicas incluyen geología, astronomía, química y física.

La física es más que una parte de las ciencias físicas. Es la ciencia *básica*. Tiene que ver con la naturaleza de las cosas básicas como movimiento, fuerzas, energía, materia, calor, sonido, luz y la estructura de los átomos. La química trata de cómo se junta la **F I G U R A 1 . 9**

El “bote salvavidas” del planeta Tierra: una hermosa mezcla de ciencia y tecnología.

materia, cómo los átomos se combinan para formar moléculas y cómo las moléculas se combinan para construir los diversos tipos de materia del entorno. La biología es más compleja e involucra materia que está viva. De modo que, debajo de la biología, está la química, y debajo de la química, está la física. Los conceptos de la física llegan a esas ciencias más complicadas. Es por eso por lo que la física es la ciencia más básica.

Hay una piscina del bien. Sin

La comprensión de la ciencia comienza con la comprensión de la física. Los siguien-importar dónde pongas tu gota,

tes capítulos presentan la física conceptualmente, de modo que puedas disfrutar su toda la piscina sube.– *Will Maynez*

comprensión.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Cuál de las siguientes actividades involucra la expresión más humana de pasión, talento e inteligencia?

a.

Pintura y escultura

d.

Religión

b.

Literatura

e.

Ciencia

c.

Música

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

¡Todas ellas! Sin embargo, el valor humano de la ciencia es el menos comprendido por la mayoría de los individuos de la sociedad. Las razones son diversas, y van desde la noción común de que la ciencia es incomprensible para las personas de habilidad promedio, hasta la opinión extrema de que la ciencia es una fuerza deshumanizadora en la sociedad. Es probable que la mayor parte de las malas interpretaciones acerca de la ciencia surjan de la confusión entre los *abusos* de la ciencia y la ciencia en sí.

La ciencia es una actividad humana encantadora compartida por una gran variedad de personas que, con las herramientas y el conocimiento actuales, llegan más lejos y descubren más de ellos mismos y de sus ambientes que las personas en el pasado pudieron haber logrado alguna vez. Mientras más sepas de ciencia, más apasionado te sentirás por tus alrededores. ¡Hay física en todo lo que ves, escuchas, hueles, saboreas y tocas!

1.6 En perspectiva

Hace apenas algunos siglos, los artistas, arquitectos y artesanos más talentosos y habilidosos del mundo dirigían su genio y esfuerzo a la construcción de las grandes catedrales, sinagogas, templos y

mezquitas. Algunas de esas estructuras arquitectónicas tardaron siglos en construirse, lo que significa que nadie fue testigo del comienzo y del final de la construcción. Incluso los arquitectos y primeros constructores que vivieron hasta una edad madura nunca vieron los resultados terminados de su labor. Vidas enteras se consumieron en las sombras de la construcción que debió parecer sin principio ni fin. Esta enorme concentración de energía humana fue inspirada por una visión que rebasaba las preocupaciones mundanas: una visión del cosmos. Para las personas de esa época, las estructuras que erigían eran sus "naves espaciales de fe", firmemente ancladas pero apuntando al cosmos.

En la actualidad, los esfuerzos de muchos de los más habilidosos científicos, artistas, ingenieros y técnicos se dirigen a construir las naves espaciales que ya orbitan la Tierra y otras que viajarán más allá. El tiempo necesario para construir dichas naves espaciales es extremadamente breve en comparación con el tiempo empleado en construir las estructuras de piedra y mármol del pasado. Muchas personas que trabajan en las naves espaciales de hoy ya habían nacido antes de que el primer avión transportara pasajeros. ¿A dónde se dirigirán vidas más jóvenes en un tiempo similar?

C A PÍ T U LO 1 R E V ISI Ó N

17

La humanidad parece estar ante el amanecer de un gran cambio en el crecimiento humano pues, como sugiere el pequeño Evan en la fotografía que precede el comienzo de este capítulo, es posible que sea como el pollito que sale del cascarón cuando se agotan los recursos de su ambiente dentro del huevo y está a punto de salir a una nueva variedad de posibilidades. La Tierra es la cuna de la humanidad y le ha funcio-nado bien. Pero las cunas, por muy cómodas que sean, quedan pequeñas algún día.

De modo que, con la inspiración que en muchas formas es similar a la inspiración de quienes construyeron las primeras catedrales, sinagogas, templos y mezquitas, la humanidad se dirige al cosmos.

¡Vives en una época emocionante!

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)
Método científico. Principios y procedimientos para la

Hecho. Enunciado acerca del mundo en el que coinciden

búsqueda sistemática de conocimiento que involucra

observadores competentes que han realizado una serie

el reconocimiento y la formulación de un problema, la

de observaciones.

recopilación de datos mediante observación y experimentos,

Ley. Hipótesis o enunciado general acerca de la relación de

y la formulación y puesta a prueba de hipótesis.

cantidades naturales que se ha puesto a prueba una y

Hipótesis. Conjetura informada; explicación razonable

otra vez y no se ha contradicho. También conocida como

de una observación o resultado experimental que no es

principio.

completamente aceptado como factual hasta que se pone a

Teoría. Síntesis de un gran cuerpo de información que abarca prueba una y otra vez con experimentos.

hipótesis bien probadas y verificadas acerca de ciertos

Actitud científica. Método científico inclinado hacia el

aspectos del mundo natural.

análisis, la integridad y la humildad.

Pseudociencia. Ciencia falsa que pretende ser ciencia real.

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N)
1.1 Mediciones científicas

"valor de sus convicciones". Un cambio de opinión se ve

1. Brevemente, ¿qué es ciencia?

como señal de debilidad. ¿Cómo es que esto es diferente

2. A lo largo de las épocas, ¿cuál ha sido la reacción general en ciencia?

ante las nuevas ideas acerca de las “verdades” establecidas?

13. ¿Cuál es la prueba para saber si una hipótesis es o no

3. Cuando el Sol estaba directamente arriba en Cirene, ¿por científica?

qué no estaba directamente arriba en Alejandría?

14. En la vida diaria se observan muchos casos de personas

4. La Tierra, como todo lo demás que es iluminado por el que son sorprendidas distorsionando las cosas y

Sol, proyecta una sombra. ¿Por qué esta sombra forma un poco después son perdonadas y aceptadas por sus

cono?

contemporáneos. ¿Cómo es esto diferente en la ciencia?

5. ¿Cómo se compara el diámetro de la Luna con la

15. ¿Qué prueba puedes realizar para aumentar la

distancia entre la Tierra y la Luna?

posibilidad, en tu propia mente, de estar en lo correcto

6. ¿Cómo se compara el diámetro del Sol con la distancia respecto de una idea particular?

entre la Tierra y el Sol?

1.3 Ciencia, arte y religión

7. ¿Por qué Aristarco eligió el momento de la media

16. ¿Por qué a los estudiantes de artes se les recomienda

Luna para hacer sus mediciones y calcular la distancia

aprender de ciencia y a los estudiantes de ciencia se les

Tierra-Sol?

recomienda aprender de las artes?

8. ¿Qué son las manchas circulares de luz que se ven en el

17. ¿Las personas deben elegir entre ciencia y religión?

piso abajo de un árbol en un día soleado?

18. La comodidad psicológica es un beneficio de tener

9. ¿Cuál es la importancia de las ecuaciones en este libro?

respuestas sólidas a preguntas religiosas. ¿Qué beneficio

1.2 Métodos científicos

acompaña a la postura de no conocer las respuestas?

10. Destaca algunas características del método científico.

1.4 Ciencia y tecnología

11. Distingue entre un hecho científico, una hipótesis, una

19. Distingue con claridad entre ciencia y tecnología.

ley y una teoría.

1.5 Física: la ciencia básica

12. En la vida diaria, con frecuencia se alaba a las personas

por mantener algún punto de vista particular, por el

20. ¿Por qué a la física se le considera la ciencia básica?

 21. Perfora un orificio en una hoja de cartulina y sostén la

mide la distancia entre la cartulina y la moneda. Tu
cartulina horizontalmente en la luz solar (como en la
proporción entre el tamaño de la imagen y la distancia
Figura 1.6). Observa la imagen del Sol que se proyecta
de la imagen debe ser aproximadamente 1/110. Ésta
abajo. Para convencerte de que la mancha redonda
también es la razón del diámetro del Sol a su distancia
de luz es una imagen del Sol redondo, intenta usar
respecto de la Tierra. Con la información de que el
orificios de diferentes formas. Un orificio cuadrado o
Sol está a 150,000,000 kilómetros de la Tierra, calcula
triangular también proyectará una imagen redonda
el diámetro del Sol. (Preguntas interesantes: ¿cuántas
cuando la distancia a la imagen sea grande comparada
monedas colocadas extremo con extremo cabrían entre la
con el tamaño del orificio. Cuando los rayos del Sol y la
imagen solar y la cartulina? ¿Cuántos soles cabrían entre
superficie de la imagen son perpendiculares, la imagen
la cartulina y el Sol?)
es un círculo; cuando los rayos del Sol forman un ángulo
22. Elije un día particular en el futuro muy cercano,
con la superficie de la imagen, la imagen es un círculo
y durante ese día lleva contigo una pequeña libreta y
“alargado”, una elipse. Deja que la imagen solar caiga

registra cada vez que entras en contacto con tecnología
sobre una moneda. Coloca la cartulina de modo que
moderna. Después escribe una página o dos donde
la imagen apenas cubra la moneda. Ésta es una forma
analices qué tanto dependes de las tecnologías de tu
conveniente de medir el diámetro de la imagen: el mismo
lista. Toma nota de cómo serías afectado si súbitamente
que el diámetro de la moneda fácil de medir. Luego
desaparecieran cada una y cómo lidiarías con la pérdida.

P I E N S A Y E X P L I C A (S Í N T E S I S)

23. ¿Cuál es el castigo del fraude científico en la comunidad
temperatura (en algunos sopletes de soldador pueden
científica?
encontrarse temperaturas más altas), sino porque el Sol
24. ¿Cuáles de las siguientes son hipótesis científicas?
es grande. ¿Cuál estimas es más grande: el radio del
(a) La clorofila hace verde al pasto. (b) La Tierra gira
Sol o la distancia entre la Luna y la Tierra? Comprueba
en torno a su eje porque las cosas vivientes necesitan
tu respuesta en la lista de datos físicos en las guardas de
alternancia de luz y oscuridad. (c) Las mareas son
este libro. ¿Te sorprende tu respuesta?
provocadas por la Luna.
27. ¿Qué es lo que probablemente entiende mal una persona

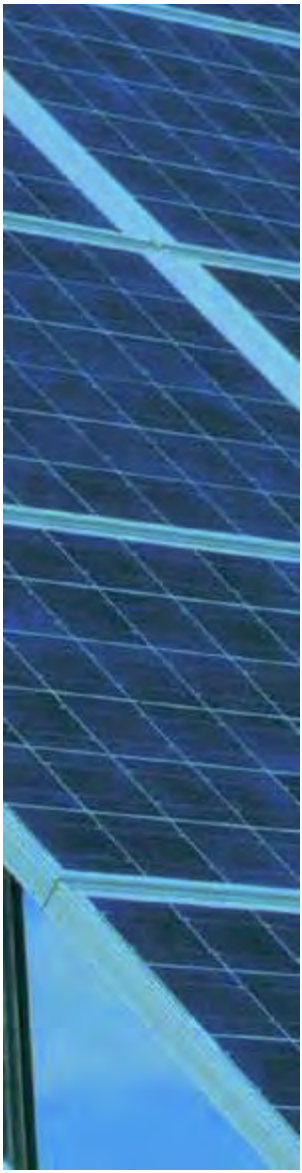
25. Para responder a la pregunta de “cuando una planta
que dice, “pero esa sólo es una teoría científica”?
crece, ¿de dónde proviene el material?”, Aristóteles
28. Se observa que la sombra proyectada por un pilar vertical
planteó por lógica la hipótesis de que todo el material
en Alejandría al mediodía durante el solsticio de verano
provenía del suelo. ¿Consideras que su hipótesis es
es 1/8 la altura del pilar. La distancia entre Alejandría y
correcta, incorrecta o parcialmente correcta? ¿Qué
Cirene es 1/8 el radio de la Tierra. ¿Existe una conexión
experimentos propones para apoyar tu elección?
geométrica entre estas dos razones 1 a 8?
26. Cuando caminas de la sombra a la luz solar, el calor del
29. Si la Tierra fuera más pequeña de lo que es, pero la
Sol es tan evidente como el calor de los carbones calientes
distancia de Alejandría a Cirene fuera la misma, ¿la
de una hoguera en una habitación que de otro modo
sombra del pilar vertical en Alejandría sería más larga o
estaría fría. Sientes el calor del Sol no debido a su alta
más corta al mediodía durante el solsticio de verano?

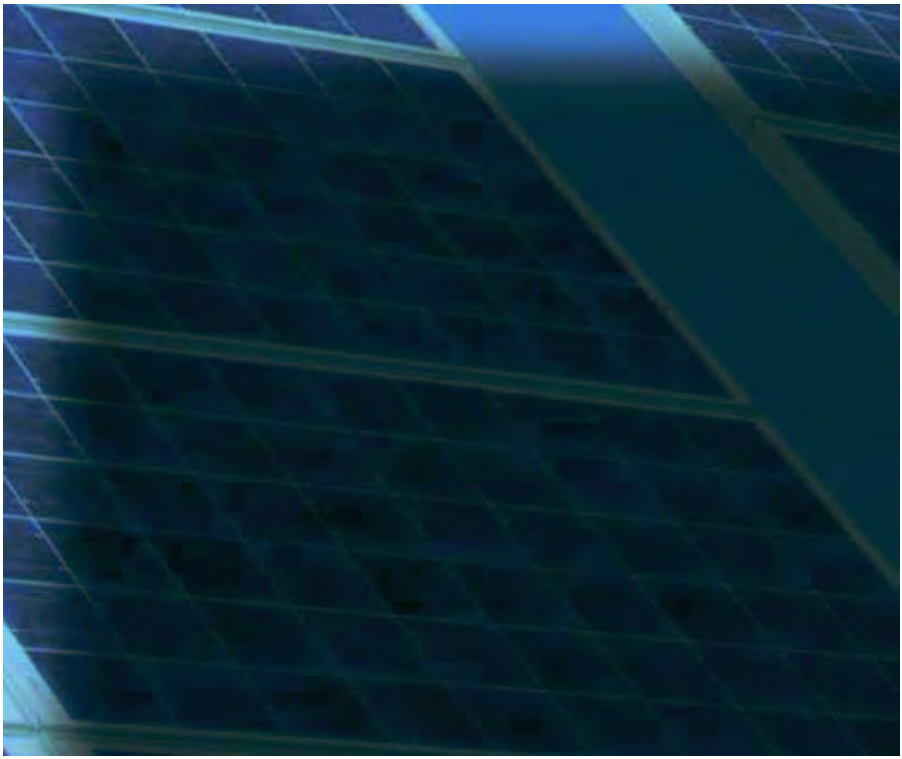
P I E N S A Y D I S C U T E (E V A L U A C I Ó N)

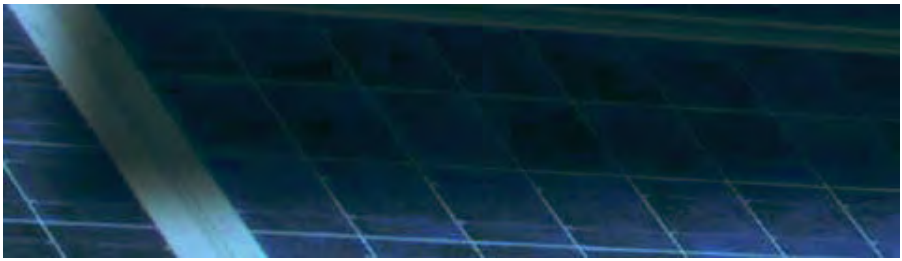
30. El gran filósofo y matemático Bertrand Russell (1872-
con ejemplos bien elegidos. Lo que sí sostendré, y sostendré
1970) escribió sobre ideas en la primera parte de su vida

vigorosamente, es que el conocimiento con mayor frecuencia
que rechazó en la última parte de su vida. Discute con
es más útil que dañino y que el temor al conocimiento es
tus compañeros si ves en esto un signo de debilidad o
con mayor frecuencia más dañino que útil". Discute con tus
un signo de fortaleza en Bertrand Russell. (¿Supones
amigos ejemplos que respalden esta afirmación.
que tus ideas actuales acerca del mundo que te rodea
32. Tu joven familiar favorito se pregunta si debe integrarse
cambiarán a medida que aprendas y experimentes
a un grupo cada vez más grande de la comunidad,
más, o supones que mayor conocimiento y experiencia
principalmente para hacer nuevos amigos. Él busca
solidificarán tu comprensión actual?)
tu consejo. Antes de responder, te enteras de que el
31. Bertrand Russell escribió: "creo que debemos conservar
carismático líder del grupo dice a sus seguidores: "muy
la creencia de que el conocimiento científico es una de
bien, así es como operamos: primero, NUNCA deben
las glorias de la humanidad. No sostendré que dicho
cuestionar nada de lo que yo les diga. En segundo lugar,
conocimiento nunca puede causar daño. Considero que
NUNCA deben cuestionar lo que lean en nuestras
tales proposiciones generales casi siempre pueden refutarse

publicaciones”. ¿Qué le aconsejarías?



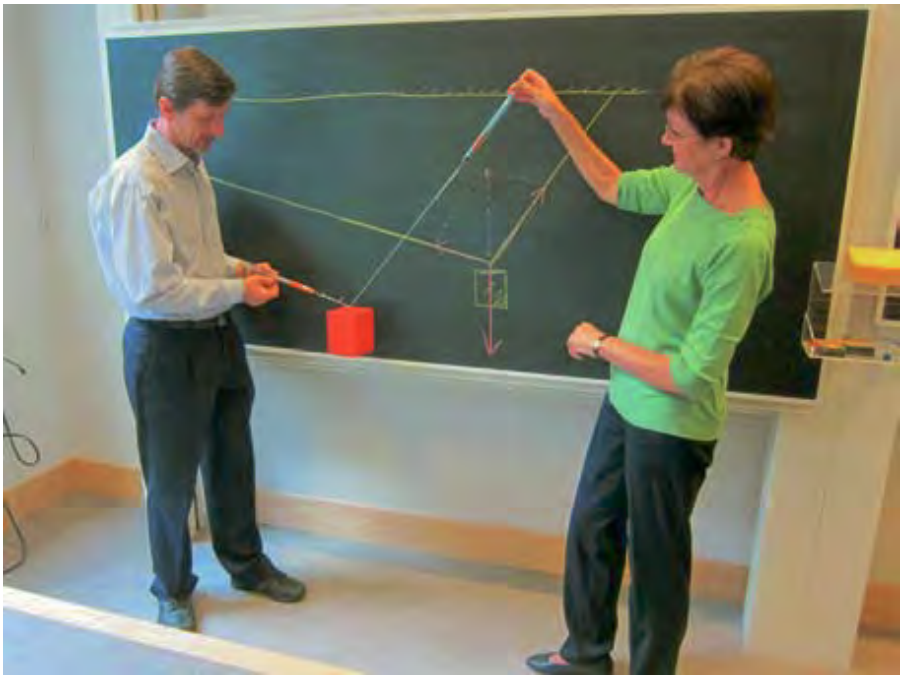




P A R T E U N O

Mecánica

¡Intrigante! El número de bolas que se sueltan en el conjunto de bolas siempre es el mismo número que surge del otro lado. Pero, ¿por qué? Debe haber una razón, reglas mecánicas de algún tipo. Sabré por qué las bolas se comportan de manera tan predecible después de aprender las reglas de la mecánica en los siguientes capítulos. Pero, lo mejor de todo es que, ¡aprender estas reglas me permitirá tener una intuición más aguda para comprender el mundo que me rodea!



C A P Í T U L O 2

Primera ley

de Newton de

2

movimiento:

inercia

2.1

Aristóteles en movimiento

2.2

Los experimentos de Galileo

3

2.3

Primera ley de Newton de movimiento

2.4

Fuerza neta y vectores

2.5

La regla del equilibrio

2.6

Fuerza de sostén

2.7

Equilibrio de cosas en movimiento

2.8

La Tierra en movimiento

4

1 Will Maynez muestra que la inercia del yunque sobre el pecho del autor es suficiente para protegerlo contra el golpe del martillo.

2 La roca en equilibrio ilustra de un modo sorprendente la inercia.

3 Cedric y Ann Linder comparan las diferentes tensiones de la cuerda que sostiene el cubo rojo. **4** Karl Westerberg pregunta a sus alumnos cuál cuerda, la inferior o la superior, se romperá

cuando súbitamente jale hacia abajo la cuerda inferior.

C A PÍ T U LO 2 P

R I M ER A L E Y D E N E W TO N D E M OV I M I EN TO: I

O: I N ERCI A

21

No todos los instructores de física sienten afecto por empleo para establecer una División de Investigación de la *Física conceptual*. Algunos sin duda prefieren la Enseñanza de la Física en el Departamento de Física adoptar una postura práctica de "arremangarse la

y Astronomía en dicha universidad. Cedric y su esposa

camisa" y meterse de inmediato en la resolución de proble-

Anne consideran ahora a Uppsala su hogar, donde Anne

mas, sin dedicar tiempo a la comprensión de conceptos.

trabaja como investigadora y administradora de su grupo.

En 1992 me sentí halagado de ver un artículo en la revista

Los Linder llevan educadores de todo el mundo a sus

The Physics Teacher escrito por un profesor de Sudáfrica

seminarios y talleres,

quien informaba haber tenido gran éxito con la enseñanza

con actividades de físi-

de la física de manera conceptual. Entré en contacto con él

ca muy estimulantes.

y hemos sido amigos desde entonces. Hablo de Cedric Lin-

Algunos profesores de

der, quien creció y obtuvo la mayor parte de su educación

física tienen la habi-

en física en Sudáfrica, continuó su educación científica en

lidad de hacer de la

Rutgers, en Nueva Jersey, y luego acudió a la University

física una experiencia

of British Columbia, donde obtuvo su doctorado en 1989.

fascinante. Qué bue-

Como resultado del artículo de Cedric, en el que enal-

no que Cedric forma

tecía la forma conceptual de enseñanza, y su investigación

parte de este grupo... y

en el campo de la enseñanza de la física, lo buscaron edu-

que lo expande.

cadores de la Uppsala University, en Suecia. Aceptó un

2.1 Aristóteles en movimiento

Aristóteles dividió el movimiento en dos clases principales: *movimiento natural* y *movimiento violento.* Se considerará de manera breve cada uno de ellos, no como material de estudio, sino como un antecedente de las ideas actuales acerca del movimiento.

Aristóteles afirmó que el movimiento natural procedía de la "naturaleza" de un objeto, y dependía de la combinación de los cuatro elementos (tierra, agua, aire y fuego) que contenía el objeto. En su opinión, todo objeto del Universo tiene un lugar propio, determinado por su "naturaleza"; cualquier objeto que no esté en su lugar propio "luchará"

por llegar ahí. Al ser de la tierra, un pedazo de arcilla sin nada que la sostenga caerá al suelo; al ser del aire, un soplo de humo sin contener se elevará; al ser una mezcla de tierra y aire, pero predominantemente tierra, una pluma caerá al suelo, mas no tan rápidamente como un trozo de arcilla. Aristóteles afirmó que los objetos más pesados lucharían más duro y argumentó que los objetos deben caer con rapideces proporcionales a sus pesos: cuanto más pesado sea el objeto, más rápido debe caer.

El movimiento natural podría ser o recto hacia arriba o recto hacia abajo, como en el caso de todas las cosas sobre la Tierra, o podría ser circular, como en el caso de los objetos celestes. A diferencia del movimiento ascendente y descendente, el movimiento circular no tiene principio o fin, y se repite sin desviarse. Aristóteles creía que a los cielos les correspondían reglas diferentes y afirmó que los cuerpos celestes son esferas perfectas hechas de una sustancia perfecta e invariable, que él llamó *quintaesencia.* 1 (El único objeto celeste con alguna variación detectable sobre su cara era la Luna. Los cristianos medievales, todavía bajo el dominio de las enseñanzas de Aristóteles, explicaban con ignorancia que las imperfecciones lunares se debían a la cercanía de la Luna y la contaminación por la corrupción humana sobre la Tierra.)

El movimiento violento, la otra clase de movimiento de Aristóteles, resultaba de fuerzas de empuje o tirón. El movimiento violento era un movimiento impuesto. Una persona que empuja un carro o levanta un peso impone movimiento, como lo hace alguien que lanza una piedra

o gana una competencia de tirar de la cuerda. El viento impone movimiento a los barcos. Las corrientes de agua imponen movimiento a las rocas y a los troncos de los árboles. Lo esencial acerca del movimiento violento era que tenía causa externa y se impartía a los objetos; no se movían por sí solos, ni por su "naturaleza", sino por empujones o tirones.

El concepto de movimiento violento tenía sus dificultades, pues los empujones y tirones que lo propiciaban no siempre eran evidentes. Por ejemplo, la cuerda del arco 1Quintaesencia es la *quinta* esencia; las otras cuatro son: tierra, agua, aire y fuego.

movía la flecha hasta que la flecha abandonaba el arco; después de ello, parecía necesario otro factor que la empujara para seguir explicando el movimiento de la flecha.

Por tanto, Aristóteles imaginó que la flecha separaba el aire y éste, en consecuencia, regresaba nuevamente para evitar la formación de vacío. Al momento de regresar, el aire apretaba la parte trasera de la flecha. Así, ésta era impulsada a través del aire como una barra de jabón que se impulsa en la bañera cuando aprietas uno de sus extremos.

En resumen, Aristóteles enseñaba que todos los movimientos se debían a la naturaleza del objeto en movimiento, o a un empuje o tirón sostenido. Siempre que un objeto esté en su lugar propio, no se moverá a menos que se someta a una fuerza. Excepto por los objetos celestes, el estado normal es de reposo.

Los postulados de Aristóteles acerca del movimiento fueron un comienzo del pensamiento científico y, aunque él no los consideró como la última palabra sobre la materia, sus seguidores durante casi 2,000 años consideraron sus ideas como incuestionables. La noción de que el estado normal de los objetos es el reposo, estuvo implícita en el pensamiento de los tiempos antiguos, la Edad Media y el inicio del Renacimiento.

Dado que era evidente para la mayoría de los pensadores hasta el siglo XVI que la Tierra debía estar en su lugar propio, y dado que una fuerza capaz de mover la Tierra era inconcebible, parecía muy claro que la Tierra no se movía.

P U N T O D E C O N T R O L

¿No es de sentido común pensar que la Tierra está en su lugar propio y que una fuerza para moverla *es* inconcebible, como sostuvo Aristóteles, y que la Tierra está en reposo en este Universo?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Las ideas de Aristóteles eran lógicas y congruentes con las observaciones cotidianas.

De modo que, a menos que te familiarices con la física que se presenta en breve en este libro, las ideas de Aristóteles sobre el movimiento sí

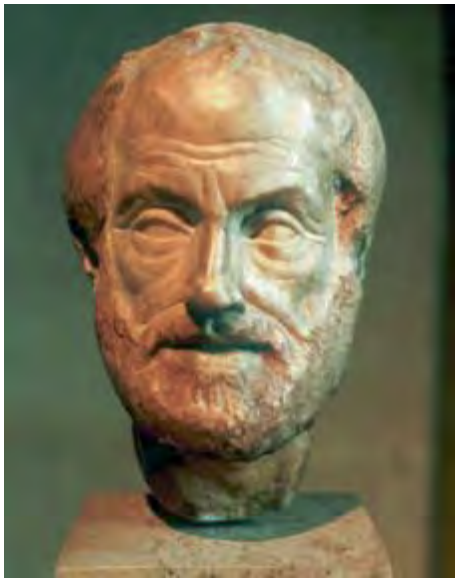
tienen sentido común. Pero, a medida que adquieras nueva información sobre las reglas de la naturaleza, probablemente descubrirás que tu sentido común avanza y deja atrás el pensamiento aristotélico.

Copérnico y la Tierra en movimiento

Fue en este clima intelectual donde el astrónomo polaco Nicolás Copérnico (1473-1543) formuló su teoría de la Tierra en movimiento. Copérnico razonó que la forma más sencilla de explicar los movimientos observados del Sol, la Luna y los planetas a través del cielo era suponer que la Tierra (y otros planetas) formaba círculos alrededor del Sol. Trabajó durante años sin hacer públicas sus ideas, por dos razones. La primera era que temía a la persecución; una teoría que difería tanto de la opinión pública con seguridad se tomaría como un ataque contra el orden establecido. La segunda razón era que él mismo tenía serias dudas al respecto; no podía reconciliar la idea de una Tierra en movimiento con las ideas prevalecientes de movimiento. Finalmente, en los últimos días de su vida, ante la exhortación de sus amigos cercanos, envió su *De Revo-lutionibus* al impresor. Recibió el primer ejemplar de su famosa exposición el día de su muerte, 24 de mayo de 1543.

Nicolás Copérnico (1473-1543)

La mayoría de las personas conoce la reacción de la Iglesia medieval ante la idea de que la Tierra se desplazara alrededor del Sol. Las ideas de Aristóteles se habían convertido tan formidablemente en parte de la doctrina católica, que contradecirlas era cuestionar a la mismísima Iglesia. Para muchos líderes eclesiásticos, la idea de una Tierra en movimiento amenazaba no sólo su autoridad, sino también los cimientos mismos de la fe y la civilización. Para bien o para mal, esta nueva idea habría de trastornar su concepción del cosmos, aunque con el tiempo la Iglesia la aceptó.



ARISTÓTELES (384-322 A. C.)

Filósofo, científico y educador griego, y clasificó casi todo el

de Aristóteles se olvidaron

Aristóteles fue hijo de un médico

conocimiento existente del

y perdieron, excepto en los

quien atendió personalmente al

mundo físico. Su táctica

estudios que continuaron

rey de Macedonia. A los 17 años de edad,

sistemática se convirtió

en los imperios bizantino

Aristóteles entró a la Academia de Platón,

en el método del cual más
e islámico. Varios textos se
donde trabajó y estudió durante 20 años,
tarde surgió la ciencia
reintrodujeron en Europa
hasta la muerte de Platón. Entonces se
occidental. Luego de su
durante los siglos XI y XII
convirtió en tutor del joven Alejandro
muerte, sus voluminosos
y se tradujeron al latín. La
Magno. Ocho años después formó su
cuadernos se conservaron
Iglesia, la fuerza política
propia escuela. La meta de Aristóteles era
en cuevas cerca de su casa
y cultural dominante
sistematizar el conocimiento existente, tal
y después se vendieron
en Europa Occidental,
como Euclides sistematizó la geometría.
a la biblioteca de Alejandría. La actividad
primero prohibió las obras de Aristóteles,
Aristóteles realizó observaciones cruciales,

académica cesó en la mayor parte de

pero luego las aceptó e incorporó en la

recolectó especímenes y reunió, resumió

Europa durante la Edad Media, y las obras

doctrina cristiana.

2.2 Los experimentos de Galileo

La torre inclinada

Fue Galileo, el más destacado científico de comienzos del siglo XVII, quien dio credibilidad a la concepción copernicana de una Tierra en movimiento. Galileo logró esto al desacreditar las ideas aristotélicas acerca del movimiento. Si bien no fue el primero en señalar las dificultades en las ideas de Aristóteles, Galileo fue el primero en proporcionar refutación concluyente mediante observación y experimentación.

Galileo derribó con facilidad la hipótesis de los cuerpos que caen propuesta por Aristóteles. Se dice que Galileo soltó objetos de varios pesos desde lo alto de la torre inclinada de Pisa para comparar sus caídas. Contrario a la afirmación de Aristóteles, Galileo descubrió que una piedra el doble de pesada que otra no cae dos veces más rápido. Excepto por el pequeño efecto de la resistencia del aire, descubrió que los objetos de diversos pesos, cuando se sueltan al mismo tiempo, caen juntos y golpean el suelo al mismo tiempo. En una ocasión, se dice que Galileo atrajo a una gran multitud para que atestiguara la caída de dos objetos de diferente peso desde lo alto de la torre. La leyenda dice que muchos observadores de esta demostración, quienes vieron a los objetos golpear el suelo al mismo tiempo, se burlaron del joven Galileo y siguieron creyendo firmemente en las enseñanzas aristotélicas.

F I G U R A 2 . 1

La famosa demostración de Galileo.

Planos inclinados

A Galileo le interesaba *cómo* se mueven las cosas más que *por qué* se mueven. Demostró que la experimentación, más que la lógica, es la mejor prueba del conocimiento.

Aristóteles fue un observador astuto de la naturaleza, y trabajó con problemas de su alrededor en lugar de estudiar casos abstractos que no ocurrían en su entorno.

El movimiento siempre involucraba un medio de resistencia como el aire o el agua.

Aristóteles creyó que un vacío era imposible y, por tanto, no le dio seria consideración al movimiento en ausencia de un medio de interacción. Por esta razón, para Aristóteles era básico que un objeto necesitara un empuje o un tirón para mantenerse en movimiento. Y fue este principio básico el que rechazó Galileo cuando afirmó que, si no hay nada que interfiera con un objeto en movimiento, éste seguirá moviéndose en línea recta por siempre, sin necesitar de un empujón, un jalón o alguna fuerza de algún tipo.

24

PA R T E U N O

M EC Á N I C A

GALILEO GALILEI (1564-1642)

Galileo nació en Pisa, Italia, Aristóteles eran parte de la

el destino de Giordano

el mismo año que nació

doctrina católica. Galileo

Bruno, quien se mantuvo

Shakespeare y que murió Miguel

procedió a informar sus

firme y siguió creyendo

Ángel. Estudió medicina en la Universidad

observaciones telescópicas,

en el modelo copernicano

de Pisa y luego cambió a matemáticas.

con lo que se metió en más

del sistema solar y fue

Cultivó un temprano interés por el

problemas con la Iglesia.

quemado en la hoguera

movimiento y pronto tuvo diferencias con

Contó de sus observaciones

en 1600. No obstante,

sus contemporáneos, quienes sostenían

de las lunas que orbitan al

Galileo fue sentenciado a

las ideas aristotélicas de la caída de los

planeta Júpiter. Sin embargo, la

arresto domiciliario perpetuo.

cuerpos. Los experimentos de Galileo
Iglesia enseñaba que todo lo que
Anteriormente, se había lesionado
con los cuerpos que caen desacreditó la
estaba en los cielos giraba alrededor de la
los ojos mientras investigaba el Sol en
afirmación de Aristóteles de que la rapidez
Tierra. Galileo también informó sobre las
sus estudios telescópicos, lo que generó
de un objeto que cae era proporcional a su
manchas oscuras del Sol, pero, de acuerdo
su ceguera a los 74 años de edad. Murió
peso, como se señaló antes. Pero, algo muy
con la doctrina eclesiástica, Dios había
cuatro años después. Toda época tiene
importante fue que, los hallazgos de Galileo
creado el Sol como una fuente perfecta
rebeldes intelectuales, algunos de los cuales
también amenazaban la autoridad de la
de luz, sin defectos. Bajo presión, Galileo
amplían las fronteras del conocimiento.
Iglesia, que sostenía que las enseñanzas de
se retractó de sus descubrimientos y evitó
Entre ellos, ciertamente, está Galileo.

Para poner a prueba esta hipótesis, Galileo hizo experimentos con el movimiento de Pendiente descendente:

varios objetos sobre superficies planas inclinadas en varios ángulos. Observó que las bolas aumento de rapidez

que rodaban sobre planos con pendiente descendente adquirían rapidez, en tanto que las bolas que rodaban sobre planos con pendiente ascendente perdían rapidez. Con base en esto, razonó que las bolas que rodaban a lo largo de un plano horizontal ni acelerarían ni frenarían. La bola finalmente llegaría al reposo no debido a su "naturaleza", sino debido a la fricción. Esta idea quedó respaldada con las observaciones de Galileo acerca del movimiento sobre superficies más lisas: cuando había menos fricción, el movimien-Pendiente ascendente:

to de los objetos persistía durante más tiempo; a menos fricción, más se acercaba el disminución de rapidez

movimiento a una rapidez constante. Galileo razonó que, en ausencia de fricción u otras fuerzas que se opusieran, un objeto con movimiento horizontal continuaría moviéndose indefinidamente.

Esta afirmación fue apoyada por un experimento diferente y otra línea de razonamiento. Galileo colocó dos de sus planos inclinados uno frente al otro. Observó Sin pendiente:

¿cambia la rapidez?

Posición inicial

Posición final

F I G U R A 2 . 2

Movimiento de bolas sobre varios

planos.

Posición inicial

Posición final

Posición inicial

¿Dónde es la posición final?

F I G U R A 2 . 3

Una bola que rueda hacia abajo por un plano inclinado en el lado izquierdo tiende a rodar hacia arriba hasta su altura inicial en el derecho. La bola debe rodar una mayor distancia a medida que se reduce el ángulo de inclinación a la derecha.

que una bola que se suelta desde una posición de reposo en lo alto de un plano con pendiente descendente rodaba hacia abajo y luego subía por el plano con pendiente ascendente hasta que casi alcanzaba su altura inicial. Razonó que sólo la fricción impedía que se elevara hasta exactamente la misma altura, porque cuanto más lisos los planos, más se acercaba la bola a la misma altura. Luego redujo el ángulo del plano con pendiente ascendente. De nuevo la bola alcanzaba la misma altura, pero tenía que recorrer más distancia. Más reducciones del ángulo produjeron resultados similares: para llegar a la misma altura, la bola tenía que recorrer más distancia cada vez. Entonces planteó la pregunta: “si tengo un plano horizontal largo, ¿cuán lejos debe ir la bola para alcanzar la misma altura?”. La respuesta obvia es, “al infinito: nunca alcanzará su altura inicial”.2

Galileo analizó esto todavía en otra forma. Dado que el movimiento descendente de la bola desde el primer plano es el mismo para todos los casos, la rapidez de la bola cuando comienza a moverse hacia arriba del segundo plano es la misma para todos los casos. Si asciende por una pendiente inclinada, pierde muy pronto su rapidez.

En una pendiente menos inclinada, pierde su rapidez más lentamente y rueda durante más tiempo. Cuanto menos inclinada sea la pendiente

ascendente, más lentamente Galileo publicó el primer trata-perderá su rapidez. En el caso extremo donde no haya pendiente en absoluto, es decir, miento matemático del movimien-cuando el plano sea horizontal, la bola no debe perder rapidez alguna. En ausencia de to en 1632, 12 años después de

fuerzas retardadoras, la tendencia de la bola es moverse por siempre sin frenar. A esta que los peregrinos desembarcaran

propiedad de un objeto de resistir los cambios en el movimiento se le denomina **inercia**.

en Plymouth Rock.

El concepto de inercia de Galileo desacreditó la teoría aristotélica del movimiento.

Aristóteles no reconoció la idea de la inercia porque no imaginó cómo sería el movimiento sin fricción. En su experiencia, todos los movimientos están sujetos a una resistencia, e hizo de este suceso el centro de su teoría del movimiento. El hecho de que Aristóteles no reconociera la fricción por lo que es (una fuerza como cualquier otra) impidió el avance de la física durante casi 2,000 años, hasta la época de Galileo. Una aplicación del concepto de inercia de Galileo demostraría que no se necesita fuerza para mantener el movimiento continuo de la Tierra. Estaba abierto el camino para que Isaac Newton sintetizara una nueva visión del Universo.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Sería correcto decir que la inercia es la *razón* por la que un objeto en movimiento continúa en movimiento cuando ninguna fuerza actúa sobre él?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

En sentido estricto, no. No se conoce la razón por la que los objetos persisten en su movimiento cuando ninguna fuerza actúa sobre ellos. A la propiedad de los objetos materiales para comportarse de esta forma predecible se le conoce como *inercia.* Se entienden muchas cosas y se tienen etiquetas y nombres para dichas cosas. Hay muchas cosas que no se entienden, y también se tienen etiquetas y nombres para dichas cosas. La educación no consiste tanto en adquirir nuevos nombres y etiquetas, sino en saber cuáles fenómenos se entienden y cuáles no.

En 1642, muchos meses después de la muerte de Galileo, nació Isaac Newton. Para cuando Newton tenía 23 años de edad, elaboró sus famosas leyes del movimiento, que terminaron de derribar las ideas aristotélicas que dominaron el pensamiento de las La inercia no es un tipo de fuerza;

mejores mentes durante casi dos milenios. En este capítulo se aborda la primera de es una *propiedad* de toda la mate-las leyes de Newton, un replanteamiento del concepto de inercia como lo propuso ria de resistir a los cambios en el

antes Galileo. (Las tres leyes de Newton del movimiento aparecieron por primera vez movimiento.

en uno de los más importantes libros de todos los tiempos: los *Principia* de Newton.) 2Tomado de *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias*, de Galileo.

2.3 Primera ley de Newton de movimiento

La idea de Aristóteles de que un objeto en movimiento debe ser impulsado por una fuerza constante fue desechada completamente por Galileo, quien afirmó que, en *ausencia* de una fuerza, un objeto en movimiento continuará moviéndose. La tendencia de las cosas a resistir los cambios en el movimiento fue lo que Galileo llamó *inercia.* Newton **VIDEO: Ley de Newton de inercia**

perfeccionó la idea de Galileo y la convirtió en su primera ley, llamada adecuadamente **ley de la inercia**. De los *Principia* de Newton (traducido del original en latín): **Todo objeto continúa en un estado de reposo o de rapidez uniforme en una línea recta a menos que sobre él actúe una fuerza neta distinta de cero.**

La palabra clave en esta ley es *continúa:* un objeto *continúa* haciendo lo que esté haciendo a menos que sobre él se ejerza una fuerza. Si está en reposo, *continúa* en un estado de reposo. Esto se demuestra de forma graciosa cuando un mantel se retira habilidosamente de debajo de los platos en una mesa y los platos quedan en su estado inicial de reposo. Se subraya que esta propiedad de los objetos de resistir los cambios WOOSH!

en el movimiento se llama inercia.

Si un objeto está en movimiento, *continúa* moviéndose sin dar la vuelta o cambiar su **F I G U R A 2 . 4**

rapidez. Esto es evidente en las sondas espaciales que se mueven de manera continua en el La inercia en acción.

espacio exterior. Los cambios en el movimiento tienen que imponerse contra la tendencia de un objeto de conservar su estado de movimiento. En ausencia de fuerzas netas, un objeto en movimiento tiende a moverse a lo largo de una línea recta de manera indefinida.

F I G U R A 2 . 5

¿Por qué la moneda

Ejemplos de inercia.

caerá en el vaso

VIDEO: El viejo truco del mantel

cuando una fuerza

acelere la tarjeta?

¿Por qué el movimiento

descendente y la súbita

detención del martillo

aprieta la cabeza

Puedes pensar en la inercia como

del martillo?

otra palabra para llamar a la *pere-*

¿Por qué un aumento continuo

za (o resistencia al cambio).

y lento de la fuerza

descendente rompe la

cuerda por arriba de la bola

sólida, pero un aumento súbito

rompe la cuerda inferior?

VIDEO: Rollo de papel sanitario

P U N T O D E C O N T R O L

Un disco de hockey que se desliza por el hielo finalmente llega al reposo.

¿Cómo interpretaría Aristóteles este comportamiento? ¿Cómo lo interpre-tarían Galileo y Newton? ¿Cómo lo interpretarías tú?
(¡Piensa antes de leer

las respuestas!)

VIDEO: Inercia de un cilindro

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

Aristóteles probablemente diría que el disco se desliza hasta detenerse porque busca su estado propio y natural, un estado de reposo. Galileo y Newton probablemente dirían que, una vez en movimiento, el disco continúa en movimiento y que lo que impide que el movimiento continúe no es su naturaleza o su estado de reposo propio, sino la fricción que encuentra el disco. Esta fricción es pequeña comparada con **VIDEO: Inercia de un yunque**

la fricción entre el disco y un suelo de madera, por lo que el disco se desliza mucho más lejos sobre el hielo. Sólo tú puedes responder la última pregunta.

ENSAYO PERSONAL

Cuando estaba en bachillerato, mi asesor me sugirió no de manera gradual a medida que caminara hacia Burl. Era divertido inscribirme en cursos de ciencia y matemática, y en vez de

plantear tales preguntas y ver si podíamos responderlas.

ello me centrara en lo que parecía ser mi don para las artes.

Una pregunta que no podíamos responder era si la reducción de

Seguí este consejo. En ese entonces estaba interesado en dibujar

tensión en mi soga cuando me alejaba de ella sería o no *exactamente* tiras cómicas y en el boxeo, ninguna de las cuales me auguraban

compensada por un aumento de tensión en la soga de Burl. Por

mucho éxito. Después de una temporada en el ejército, probé suerte

ejemplo, si mi soga experimentara una reducción de 50 newtons, ¿la

pintando señales, y los fríos inviernos de Boston me llevaron al sur, soga de Burl ganaría 50 newtons? (En aquella época hablábamos de

a la más cálida ciudad de Miami, Florida. Ahí, a los 26 años de

libras, pero aquí uso la unidad científica de fuerza, el *newton*, que se edad, conseguí un trabajo pintando carteleras y conocí a un hombre

abrevia N.) ¿La ganancia sería *exactamente* 50 N? Y, si fuera así, ¿esta que se convirtió en una gran influencia intelectual para mí: Burl

sería una gran coincidencia? Yo no supe la respuesta sino hasta más
Grey. Como yo, Burl nunca estudió física en el bachillerato. Pero
de un año después, cuando, gracias al estímulo de Burl, abandoné la
era un apasionado de la ciencia en general, y compartía su pasión
pintura de tiempo completo para ir a la universidad a aprender más
con muchas preguntas mientras pintábamos juntos. Recuerdo que
sobre ciencia.3
Burl me preguntaba sobre las tensiones de las cuerdas que sostenían
En la universidad aprendí que cualquier objeto en reposo, como
el andamio donde estábamos. El andamio era simplemente una
el andamio para pintar carteleras que nos sostenía, se dice que
pesada plancha horizontal suspendida por un par de sogas. Burl
está en equilibrio. Esto es: todas las fuerzas que actúan sobre él se
hacía vibrar la soga más cercana a su extremo del andamio y me
equilibran en cero. De modo que la suma de las fuerzas ascendentes
pedía hacer lo mismo con la mía. Comparaba las tensiones en ambas
suministradas por las sogas de sostén de hecho compensaban
sogas, para determinar cuál era más grande. Burl era más pesado
nuestros pesos más el peso del andamio. Una pérdida de 50 N en
que yo y razonaba que la tensión de su soga era mayor. Al igual que
una se acompañaría por una ganancia de 50 N en la otra.
una cuerda de guitarra más firmemente estirada, la soga con mayor
Cuento esta historia verdadera para demostrar que uno piensa
tensión vibraba con un tono más alto. El hallazgo de que la soga de
de un modo muy diferente cuando hay una regla que guíe ese

Burl tenía un tono más alto parecía razonable porque su soga sopor-
pensamiento. Ahora, cuando miro cualquier objeto inmóvil, sé de
taba más carga.
inmediato que todas las fuerzas que actúan sobre él se cancelan. La
T1 + 50 N
T2 – 50 N
Cuando yo caminaba hacia Burl para que me prestara sus
naturaleza se observa de manera diferente cuando se conocen sus
brochas, él preguntaba si las tensiones de las sogas habían cambiado.
reglas. Sin las reglas de la física, uno tiende a ser supersticioso y a
¿La tensión de su soga aumentaba a medida que me acercaba a él?
ver magia donde no la hay. Es admirable cómo todo está conectado
Estuvimos de acuerdo en que tenía que ser así, porque incluso más
con todo lo demás por un número sorprendentemente pequeño de
de la carga era soportada por la soga de Burl. ¿Y qué hay de mi soga?
reglas, y de un modo hermosamente sencillo. La física se ocupa de
¿Su tensión disminuiría? Estuvimos de acuerdo en que lo haría,
estudiar las reglas de la naturaleza.
porque soportaría menos de la carga total. En aquel momento yo
no me daba cuenta de que estábamos discutiendo física. Burl y

yo usábamos la exageración para estimular nuestro razonamiento
Siempre estaré en deuda con Burl Grey por el estímulo que me pro-
(tal como hacen los físicos). Si ambos nos parábamos en un extremo

porcionó, porque, cuando continué mi educación formal, lo hice con entusiasmo. Perdí contacto con Burl durante 40 años. Después, un estudiante de mi clase en el Exploratorium de San Francisco, Jayson Wechter, quien era detective privado, localizó a Burl en 1998 y nos puso en contacto. La amistad se renovó y nuevamente continuamos las conversaciones animadas.

2.4 Fuerza neta y vectores

Los cambios en el movimiento se producen por una fuerza o combinación de fuerzas (en el siguiente capítulo, los cambios en el movimiento se referirán como *aceleración*).

Una **fuerza**, en el sentido más simple, es un empujón o un tirón. Su fuente puede ser gravitacional, eléctrica, magnética o simplemente esfuerzo muscular. Cuando hay más **SCREENCAST: Vectores de fuerza**

de una fuerza que actúa sobre un objeto, se considera la **fuerza *neta***. Por ejemplo, si tú y **neta**

un amigo tiran en la misma dirección con fuerzas iguales sobre un objeto, las fuerzas se combinan para producir una fuerza neta del doble de su fuerza individual. Si cada uno de ustedes tira con iguales fuerzas en direcciones *opuestas* la fuerza neta es cero. Las fuerzas iguales pero con dirección opuesta se cancelan entre sí. Se puede considerar que una de las fuerzas es la negativa de la otra, y algebraicamente suman cero, con una fuerza neta **VIDEO: Definición de newton**

resultante de cero.

La Figura 2.6 muestra cómo se combinan las fuerzas para producir una fuerza neta.

Un par de fuerzas de 5 newtons en la misma dirección produce una fuerza neta de 10 newtons (el newton, N, es la unidad científica de fuerza). Si las fuerzas de 5 newtons están en direcciones opuestas, la fuerza neta es cero. Si 10 newtons de fuerza se ejercen hacia la derecha y 5 newtons hacia la izquierda, la fuerza neta es 5 newtons hacia la derecha. Las fuerzas se muestran con flechas. Cuando la longitud y la dirección de dichas flechas se dibujan a escala, a la flecha se le denomina **vector**.

F I G U R A 2 . 6

Fuerza neta (una fuerza de 5 N es

Fuerzas aplicadas

Fuerza neta

aproximadamente 1.1 lb).

5 N

5 N

10 N

5 N

5 N

0 N

5 N

10 N

5 N

Cualquier cantidad que requiere tanto magnitud como dirección para una descripción completa es una **cantidad vectorial** (Figura 2.7). Algunos ejemplos de cantidades vectoriales son fuerza, velocidad y aceleración. Por el contrario, una cantidad que pue-F I G U R A 2 . 7

de describirse sólo con una magnitud, sin involucrar dirección, se denomina **cantidad** Este vector, a escala de modo que 1 cm

escalar. La masa, el volumen y la rapidez son cantidades escalares.

es igual a 20 N, representa una fuerza de

60 N hacia la derecha.

Sumar vectores que actúan a lo largo de direcciones paralelas es asunto sencillo: si actúan en la misma dirección, se suman; si actúan en direcciones opuestas, se restan.

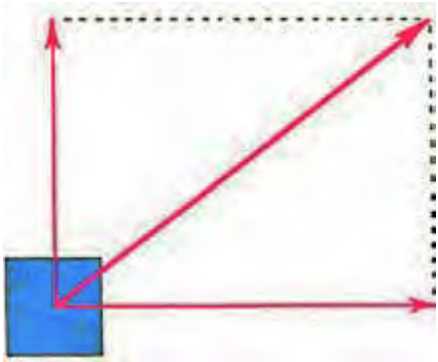
La suma de dos o más vectores se denomina **resultante**. Para encontrar la resultante de El vector cupido dice: “yo sólo era

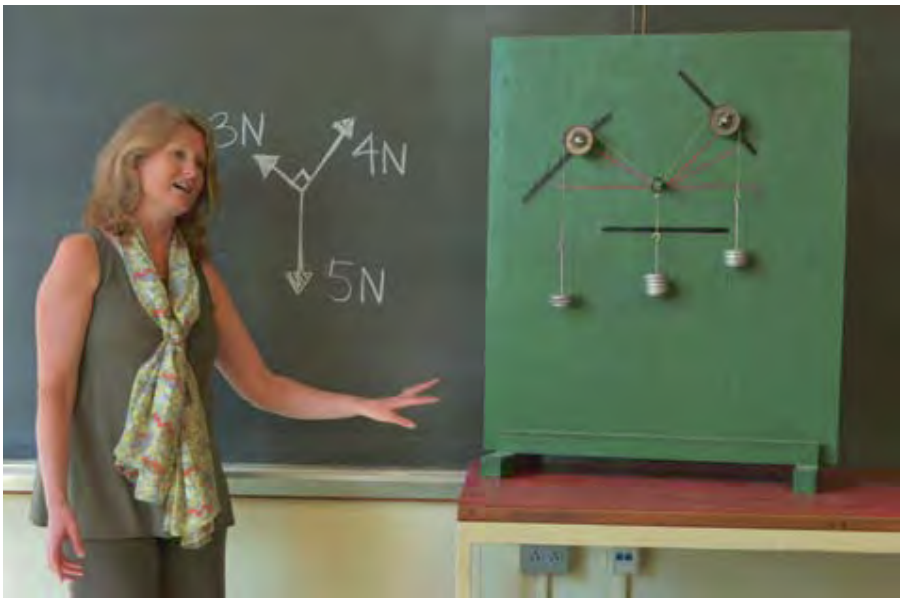
un escalar hasta que tú llegaste y

me diste dirección”.

F I G U R A 2 . 8

El par de vectores mutuamente perpendiculares forman dos lados de un rectángulo, cuya diagonal es su resultante.




3N
4N
5N

dos vectores que no actúan exactamente en la misma dirección o en dirección opuesta, se utiliza la *regla del paralelogramo.* 4 Construye un paralelogramo en el que los dos vectores sean los lados adyacentes: la diagonal del paralelogramo muestra la resultante.

En la Figura 2.8, los paralelogramos son rectángulos.

2

En el caso especial de dos vectores que tienen la misma magnitud y son mutua-1

mente perpendiculares, el paralelogramo es un cuadrado (Figura 2.9). Dado que para cualquier cuadrado la longitud de una diagonal es V2, o 1.41, veces uno de los lados, 45°

la resultante es V2 veces uno de los vectores. Por ejemplo, la resultante de dos vectores perpendiculares con igual magnitud de 100 es 141.

1

Vectores de fuerza

F I G U R A 2 . 9

Cuando se suman un par de vectores

La Figura 2.10 muestra un par de fuerzas que actúan sobre una caja. Una es de perpendiculares y con la misma longitud, 30 newtons y la otra es de 40 newtons. Una medición simple muestra que la resultante forman un cuadrado. La diagonal del de este par de fuerzas es de 50 newtons.

cuadrado es la resultante y su valor es V2

La Figura 2.11 muestra a Nellie Newton colgando en reposo de un tendedero. Ob- veces la longitud de cualquier lado.

serva que el tendedero actúa como un par de sogas que forman diferentes ángulos con la vertical. Los tres pasos que se muestran ahí son tres fuerzas que actúan sobre Nellie: 50 N

su peso, una tensión del lado izquierdo de la soga y una tensión del lado derecho de la 30 N

soga. Debido a los diferentes ángulos, en cada lado de la soga habrá distintas tensiones.

Puesto que Nellie cuelga en equilibrio, las dos tensiones de la soga deben sumarse vec-torialmente para igualar y oponerse a su peso. ¿Cuál lado tiene mayor tensión? La regla del paralelogramo muestra que la tensión en la soga derecha es mayor que la tensión en la soga izquierda. Si mides los vectores, verás que la tensión en la soga derecha es aproxi-40 N

madamente el doble que la tensión en la soga izquierda. Ambas tensiones de soga se combinan para sostener el peso de Nellie.

F I G U R A 2 . 1 0

La resultante de las fuerzas de 30 N

y 40 N es 50 N.

F I G U R A 2 . 1 1

(a) La fuerza debida a la gravedad sobre

Nel ie se muestra mediante el vector vertical descendente. Para el equilibrio se necesita un vector igual y opuesto, que se muestra con el vector punteado. (b) Este vector punteado es la diagonal de un paralelogramo definido por las

(a)

(b)

(c)

líneas verdes. (c) Ambas tensiones de soga se muestran mediante los vectores construidos. La tensión es mayor en la soga derecha, la que tiene más probabilidad de romperse.

F I G U R A 2 . 1 2

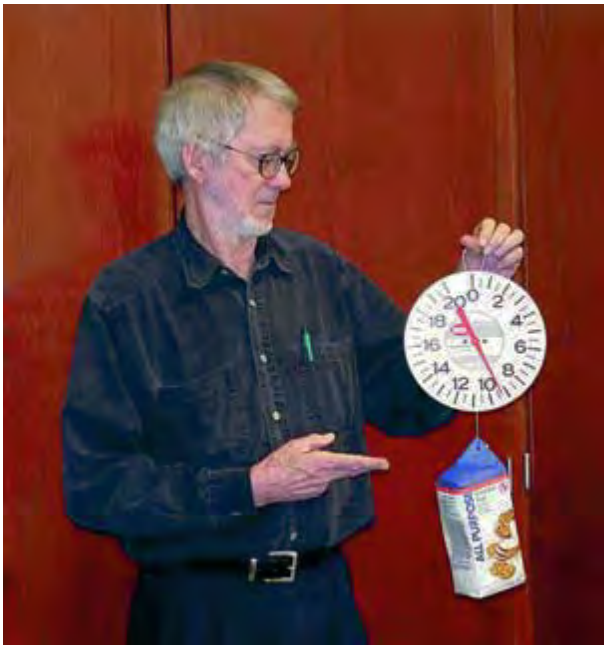
Diana Lininger Markham ilustra la disposición de los vectores de la Figura 2.11.

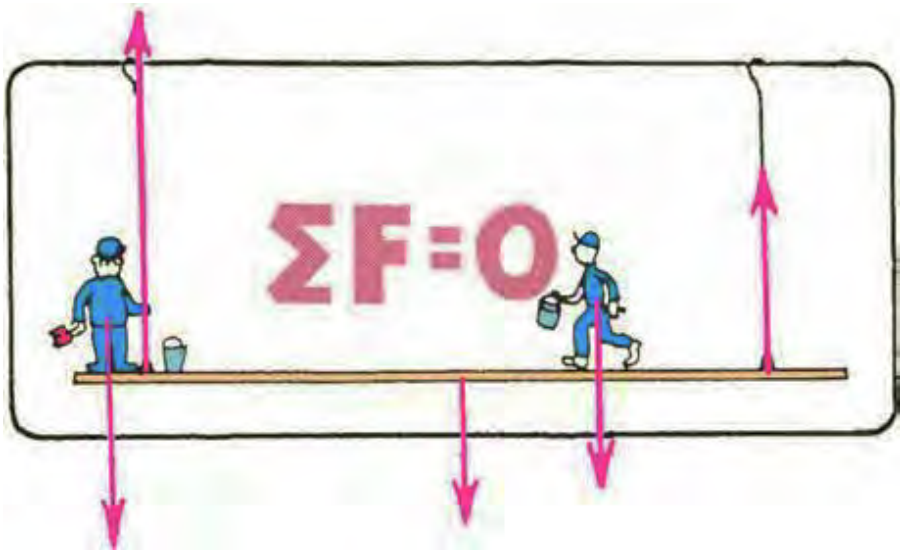
SCREENCAST: Tensión de la soga de Nellie

SCREENCAST: Las sogas de Nellie

4Un paralelogramo es una figura de cuatro lados y cuyos lados opuestos son paralelos entre sí. Por lo general, para determinar la longitud de la diagonal realizas una medición, pero en el caso especial en el que los dos vectores **X** y **Y** son perpendiculares (un cuadrado o un rectángulo), puedes aplicar el teorema de Pitágoras, **R2** 5 **X2** 1 **Y2**, para encontrar la resultante: **R** 5

X2 1 Y2.





30

PA R T E U N O

M EC Á N I C A

En el Apéndice D al final de este libro puedes encontrar más sobre los vectores de fuerza, así como en la sección *Practicando la física*. En el siguiente capítulo estudiarás los vectores de velocidad.

2.5 La regla del equilibrio

Si amarras una cuerda alrededor de una bolsa de harina de 2 libras y la cuelgas de una báscula (Figura 2.13), un resorte de la báscula se estira hasta que en la báscula se lee 2 libras. El resorte estirado está bajo una "fuerza de elongación" llamada *tensión.* La misma báscula en un laboratorio de ciencias es probable que esté calibrada para leer la misma fuerza como 9 newtons. Tanto las libras como los newtons son unidades de peso, que a su vez son unidades de *fuerza.* La bolsa de harina es atraída hacia la Tierra con una fuerza gravitacional de 2 libras o, su equivalente, 9 newtons.

F I G U R A 2 . 1 3

Cuelga de la báscula el doble de harina y la lectura será 18 newtons.

Burl Grey, quien introdujo al autor en

las fuerzas de tensión, suspende una

Observa que existen dos fuerzas que actúan sobre la bolsa de harina: la fuerza de bolsa de harina de 2 lb de un dinamó-tensión que actúa hacia arriba y el peso que actúa hacia abajo. Las dos fuerzas sobre metro, que muestra su peso y la tensión

la bolsa son iguales y opuestas, y se cancelan para dar cero. Por tanto,

la bolsa perma-de la cuerda de aproximadamente 9 N.

nece en reposo. De acuerdo con la primera ley de Newton, ninguna fuerza neta actúa sobre la bolsa. La primera ley de Newton se puede ver de un modo distinto: *equilibrio mecánico.*

Cuando la fuerza neta sobre un cuerpo es cero, se dice que dicho cuerpo está en **equilibrio mecánico**.5 En notación matemática, la **regla del equilibrio** es g ***F*** 0

El símbolo g representa la "suma vectorial de" y ***F*** representa las "fuerzas". Para un objeto suspendido en reposo, como la bolsa de harina, la regla dice que las fuerzas que actúan hacia arriba sobre el objeto deben estar equilibradas por otras fuerzas que actúen hacia abajo, de modo que la suma vectorial sea igual a cero. (Las cantidades vectoriales tienen en cuenta la dirección, de modo que si las fuerzas ascendentes son , las fuerzas descendentes son , y cuando se suman en realidad se restan.)

En la Figura 2.14 se observan las fuerzas que intervienen en el andamio que Burl y Hewitt usan para pintar. La suma de las tensiones ascendentes es igual a la suma de sus pesos más el peso del andamio. Observa cómo las magnitudes de los dos vectores ascendentes son iguales a la magnitud de los tres vectores descendentes. La fuerza neta sobre el andamio es cero, así que se dice que está en equilibrio mecánico.

F I G U R A 2 . 1 4

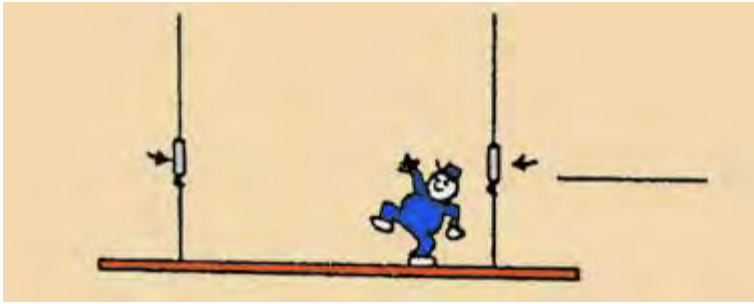
SCREENCAST: Diagramas

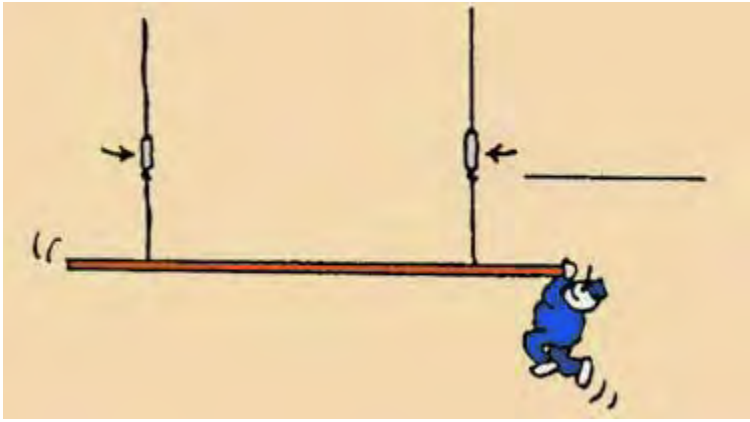
La suma de las fuerzas ascendentes es igual a la suma de las fuer-

de vectores de fuerza

zas descendentes. g ***F*** 0 y el andamio está en equilibrio.

5Un objeto que está en equilibrio está sin cambio en su estado de movimiento. Cuando estudies el movimiento rotacional en el capítulo 8, verás que otra condición para el equilibrio mecánico es que el *momento de torsión (torque)* neto sea igual a cero.





P U N T O D E C O N T R O L

Observa a la gimnasta que cuelga de los anillos.

Todo lo que no experimenta

cambio en su movimiento está en

equilibrio mecánico. Esto ocurre

cuando g *F* 0.

1. Si cuelga con su peso dividido equitativamente entre los dos anillos,

¿cómo se compararían con su peso las lecturas de la báscula en ambas cuerdas de sostén?

2. Supón que cuelga con un poco más de su peso soportado por el anillo VIDEO: Regla del equilibrio

izquierdo. ¿Cuál será la lectura de la báscula derecha?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

(¿Estás leyendo esto antes de formular respuestas razonadas en tu pensamiento? Si es así, ¿para ejercitar tu cuerpo miras a otros hacer planchas (lagartijas)? Ejercita tu pensamiento: cuando encuentres las muchas preguntas de la sección Punto de control a lo largo de este libro, ¡piensa antes de leer las respuestas!) **VIDEO: Problemas de equilibrio**

1. La lectura en cada báscula será la mitad de su peso. La suma de las lecturas de ambas básculas, entonces, es igual a su peso.

2. Cuanto más de su peso sostenga el anillo izquierdo, la lectura de la báscula derecha será menor. ¿Puedes ver que esta es una situación menos exagerada que la mostrada en la Figura 2.11, con las sogas izquierda y derecha invertidas?

PRACTICANDO LA FÍSICA

1. Cuando Burl está solo, parado exactamente en medio de su andamio, la lectura de la báscula izquierda es de 500 N. Escribe la lectura de la báscula derecha. El peso total de Burl y el andamio debe ser

N.

2. Burl se aleja del extremo izquierdo. Escribe la lectura de la báscula derecha.

500 N

N

3. Para divertirse, Burl se cuelga del extremo derecho. Escribe la lectura de la báscula derecha.

Respuestas a Practicando la física

¿Tus respuestas ilustran la regla del equilibrio? En la pregunta 1, la soga derecha experimenta **500 N** de tensión porque Burl está en medio y ambas sogas soportan 170 N

su peso por igual. Dado que la suma de las tensiones hacia arriba es 1,000 N, el N

peso total de Burl y el andamio debe ser **1,000 N**. Llama a las fuerzas de tensión ascendentes 1,000 N. Entonces, los pesos descendentes son 1,000 N. ¿Qué ocurre cuando sumas 1,000 N y 1,000 N? La respuesta es que son igual a cero.

Así ves que g ***F*** 0.

En la pregunta 2, ¿obtuviste la respuesta correcta de **830 N**? Razonamiento: a partir de la pregunta 1 sabes que la suma de las tensiones de la soga es igual a 1,000 N, y dado que la soga izquierda tiene una tensión de 170 N, la otra soga 0 N

N

debe compensar la diferencia: esto es, 1,000 N 2 170 N 830 N. ¿Lo tienes? Si es así, excelente. Si no, habla con tus amigos hasta que lo consigas. Luego lee un poco más.

La respuesta a la pregunta 3 es **1,000 N**. ¿Ves que esto ilustra que g ***F*** 0?

Piensa en un libro que yace en reposo sobre una mesa. Está en equilibrio. ¿Qué fuerzas actúan sobre el libro? Una fuerza es la de la gravedad: el *peso* del libro. Dado que el libro está en equilibrio, debe haber otra fuerza que actúe sobre el libro para producir una fuerza neta de cero: una fuerza ascendente opuesta a la fuerza de gravedad de la Tierra.

La mesa ejerce esta fuerza ascendente. A ésta se le llama *fuerza de sostén* ascendente. Esta fuerza de sostén ascendente, con frecuencia denominada *fuerza normal,* debe igualar el peso del libro.6 Si la fuerza ascendente se denomina positiva, entonces el peso descendente es negativo, y los dos suman cero. La fuerza neta sobre el libro es cero. Otra forma de decir lo mismo es g ***F*** 0.

Para entender mejor que la mesa empuja sobre el libro, compara el caso de compri-F I G U R A 2 . 1 5

mir un resorte (Figura 2.15). Si tú empujas el resorte hacia abajo, puedes sentir que el (Izquierda) La mesa empuja sobre el

libro con tanta fuerza como la fuerza

resorte empuja hacia arriba sobre tu mano. De igual modo, el libro que yace sobre la descendente de la gravedad sobre el

mesa comprime átomos en la mesa, que se comportan como resortes microscópicos.

libro. (Derecha) El resorte empuja sobre

El peso del libro presiona hacia abajo sobre los átomos, y ellos presionan hacia arriba tu mano con tanta fuerza como la que

sobre el libro. De esta forma, los átomos comprimidos producen la fuerza de sostén.

tú ejerces para empujar hacia abajo el

Cuando te paras sobre una báscula de baño, dos fuerzas actúan sobre la báscula. Una resorte.

es tu empuje hacia abajo sobre la báscula, el resultado del tirón de la gravedad sobre ti, y la otra es la fuerza de sostén hacia arriba del piso. Estas fuerzas presionan un mecanismo (en efecto, un resorte) en el interior de la báscula que está calibrado para mostrar la magnitud de la fuerza de sostén (Figura 2.16). La fuerza con la que empujas hacia

abajo sobre la báscula es tu peso, que tiene la misma magnitud que la fuerza de sostén ascendente.

Cuando estás en equilibrio, tu peso es igual a la fuerza de gravedad que actúa sobre ti.

P U N T O D E C O N T R O L

Fuerza

1. ¿Cuál es la fuerza neta sobre una báscula de baño cuando una persona gravitacional

de 150 libras se para en ella?

2. Supón que te paras sobre dos básculas de baño con tu peso dividido equi-Fuerza de sostén

tativamente entre las dos básculas. ¿Cuál será la lectura de cada báscula?

(lectura de

¿Qué ocurrirá si apoyas más de tu peso en un pie que en el otro?

la báscula)

F I G U R A 2 . 1 6

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

Tu peso es la fuerza que ejerces sobre

1. Cero, como lo demuestra la báscula que permanece en reposo. La báscula lee la una superficie de sostén, que, cuando

***fuerza de sostén,* que tiene la misma magnitud que el peso, no la fuerza neta.**

estás en equilibrio, es la fuerza gravita-

2. La lectura de cada báscula es la mitad de tu peso. Entonces, la suma de las lecturas de cional sobre ti. La lectura de la báscula

las básculas equilibrará tu peso y la fuerza neta sobre ti será cero. Si te apoyas más en muestra el valor tanto de tu peso como

una báscula que en otra, más de la mitad de tu peso se leerá en dicha báscula, pero de la fuerza de sostén.

menos en la otra, de modo que seguirán sumando tu peso. Como el ejemplo de la gimnasta que cuelga de los anillos, si una báscula lee dos tercios de tu peso, la otra báscula leerá un tercio de tu peso.

2.7 Equilibrio de cosas en movimiento

Que una fuerza neta sobre un

El reposo sólo es una forma de equilibrio. Un objeto que se mueve con rapidez constante objeto sea igual a cero no signi-en una línea recta también está en equilibrio. El equilibrio es un estado de no cambio.

fica que el objeto deba estar en

Una bola de boliche que rueda con rapidez constante en línea recta está en equilibrio, reposo, sino que su estado de

hasta que golpea los pinos. Ya sea que un objeto esté en reposo (equilibrio estático) o que movimiento permanece invariable.

ruede de manera constante en línea recta (equilibrio dinámico), g F 0.

Puede estar en reposo o en movi-

miento uniforme en línea recta.

De acuerdo con la primera ley de Newton, un objeto que está bajo la influencia de una sola fuerza, no puede estar en equilibrio. La fuerza neta podría no ser cero. Sólo cuando dos o más 6En geometría, “normal a” significa “en ángulo recto con respecto a”. Dado que esta fuerza empuja hacia arriba en ángulo recto con respecto a la superficie, se le denomina “fuerza normal”.

fuerzas actúan sobre un objeto, éste puede estar en equilibrio. Para comprobar si algo está o no en equilibrio hay que observar si experimenta o no cambios en su estado de movimiento.

Piensa en una caja que se empuja horizontalmente por el piso de una fábrica. Si se mueve con una rapidez constante en línea recta, está en equilibrio dinámico. Esto te dice que más de una fuerza actúa sobre la caja. Existe otra fuerza, probablemente la fuerza de fricción entre la caja y el suelo. El hecho de que la fuerza neta sobre la caja sea igual a cero Fuerza de fricción Fuerza aplicada

significa que la fuerza de fricción debe ser igual y opuesta a la fuerza de empuje.

de 75 N

de 75 N

La regla del equilibrio, g *F* 0, ofrece una forma razonada de ver todas las cosas en reposo: rocas en equilibrio, los objetos de tu habitación o las vigas de acero de los puentes F I G U R A 2 .17

o de la construcción de edificios. Cualquiera que sea su configuración, si un objeto está en Cuando el empuje sobre la caja es tan equilibrio estático, todas las fuerzas que actúan siempre se equilibran a cero. Lo mismo su- grande como la fuerza de fricción que el piso ejerce sobre la caja, la fuerza neta

cede con los objetos que se mueven de manera constante, que no aceleran, frenan o cam- sobre la caja es cero y se desliza con una bian de dirección. En cuanto al equilibrio dinámico, todas las fuerzas que actúan también rapidez constante.

se equilibran a cero. La regla del equilibrio te permite ver más de lo que ve el observador casual. Es bueno saber las razones de la estabilidad de las cosas del mundo cotidiano.

Existen diferentes formas de equilibrio. En el Capítulo 8 se abordará el equilibrio rotacional y, en la Parte 4, se estudiará el equilibrio térmico asociado al calor. La física está en todas partes.

P U N T O D E C O N T R O L

Un avión vuela con rapidez constante en una trayectoria horizontal recta. En otras palabras: el avión que vuela está en equilibrio. Dos fuerzas horizontales actúan sobre el avión. Una es el empuje de los propulsores que lo impulsan hacia adelante, y la otra es la fuerza de la resistencia del aire que actúa en la dirección opuesta. ¿Cuál fuerza es mayor?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Ambas fuerzas tienen la misma magnitud. Llama positiva a la fuerza hacia adelante ejercida por los propulsores. Entonces, la resistencia del aire es negativa. Dado que el avión está en equilibrio dinámico, ¿puedes ver que las dos fuerzas combinadas son igual a cero? Por tanto, ni gana ni pierde rapidez.

2.8 La Tierra en movimiento

Cuando Copérnico anunció la idea de una Tierra en movimiento

en el siglo XVI, el concepto de inercia no se comprendía. Hubo mucha controversia y debate acerca de si la Tierra se movía o no. La cantidad de fuerza necesaria para mantener la Tierra en movimiento era inimaginable. Otro argumento en contra de una Tierra en movimiento fue el siguiente: piensa en un ave sentada en reposo en la cima de un árbol alto. En el suelo hay un gusano gordo y jugoso. El ave ve el gusano, cae verticalmente y lo atrapa. Esto sería imposible, se afirmaba, si la Tierra se moviera como Copérnico sugería. Si Copérnico estuviera en lo correcto, la Tierra tendría que viajar con una rapidez de 107,000 kilómetros por hora para dar una vuelta alrededor del Sol en un año. Convierte esta rapidez a kilómetros por segundo y obtendrás 30 kilómetros por segundo. Incluso si el ave pudiera descender de su rama en un segundo, el gusano se habría desplazado una distancia de 30 kilómetros por el movimiento de la Tierra. Sería imposible que un ave descendiera en línea recta y atrapara un gusano. Pero las aves, de hecho, *atrapan* gusanos desde las ramas de los árboles altos, lo que parece clara evidencia de que la Tierra debe estar en reposo.

¿Puedes refutar este argumento? Puedes hacerlo si invocas la idea de inercia. Como ves, no sólo la Tierra se mueve a 30 kilómetros por segundo, sino también el árbol, la rama del F I G U R A 2 .18

árbol, el ave sobre la rama, el gusano que está abajo e incluso el aire entre el os. Todos se ¿Puede el ave descender en línea recta y mueven a 30 kilómetros por segundo. Las cosas en movimiento permanecen en movimien- atrapar al gusano si la Tierra se mueve a to si no actúan sobre el as fuerzas no equilibradas. De modo que, cuando el ave baja de la 30 km/s?

rama, su movimiento lateral inicial de 30 kilómetros por segundo permanece inalterado.

Atrapa al gusano, muy quitado de la pena por el movimiento de todo su entorno.

Párate junto a una pared. Salta de modo que despegues los pies del piso. ¿La pared a 30 kilómetros por segundo te golpeará? No, porque tú también viajas a 30 kilómetros por segundo: antes, durante y después de tu salto. Los 30 kilómetros por segundo es la rapidez de la Tierra en relación con el Sol, no la rapidez de la pared en relación contigo.

Hace 400 años, a las personas se les hacía difícil entender ideas como ésta, no sólo porque no reconocían el concepto de inercia, sino porque no estaban acostumbradas a moverse en vehículos de gran rapidez. Los viajes lentos sobre caminos llenos de baches en carruajes tirados por cabal os no se prestaban para experimentos que revelaran el efecto de la inercia.

En la actualidad, puedes lanzar una moneda dentro de un automóvil, autobús o avión a gran rapidez, y puedes atrapar la

moneda en movimiento vertical como lo harías si el F I G U R A 2 . 1 9

vehículo estuviera en reposo. Ves evidencia de la ley de la inercia cuando el movimiento Cuando lanzas una moneda en un avión horizontal de la moneda antes, durante y después de atraparla es el mismo. La moneda sigue a gran rapidez, ésta se comporta como si

contigo. La fuerza vertical de la gravedad afecta sólo el movimiento vertical de la moneda.

el avión estuviera en reposo. La moneda

Las nociones actuales de movimiento son muy diferentes de las de tus ancestros.

sigue contigo, ¡la inercia en acción!

Aristóteles no reconoció la idea de inercia porque no vio que todas las cosas en movimiento siguen las mismas reglas. Imaginó que las reglas del movimiento en el cielo eran muy diferentes de las reglas de movimiento sobre la Tierra. Vio el movimiento vertical como natural, pero el movimiento horizontal como innatural y que necesitaba una fuerza sostenida. Por otra parte, Galileo y Newton vieron que todas las cosas en movimiento seguían las mismas reglas. Para ellos, las cosas en movimiento *no* necesitaban fuerza para mantenerse en movimiento si no había fuerzas opuestas, como la fricción. Imagínate cuán diferente habría sido el avance de la ciencia si Aristóteles hubiera reconocido la unidad de todos los tipos de movimiento.

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)
Inercia. Propiedad de las cosas de resistir a cambios en el

Cantidad escalar. Cantidad que tiene magnitud pero no

movimiento.

dirección, como la masa y el volumen.

Primera ley de Newton de movimiento (ley de la

Resultante. El resultado neto de una combinación de dos o

inercia). Todo objeto continúa en un estado de reposo o

más vectores.

de rapidez uniforme en una línea recta a menos que sobre

Equilibrio mecánico. Estado de un objeto o sistema

él actúe una fuerza neta distinta de cero.

de objetos para los cuales no hay cambios en el

Fuerza. En el sentido más simple, un empuje o un tirón.

movimiento. De acuerdo con la primera ley de Newton,

Fuerza neta. La suma vectorial de las fuerzas que actúan

si un objeto está en reposo, el estado de reposo

sobre un objeto.

persiste. Si un objeto se mueve, el movimiento continúa

sin cambio.

Vector. Una flecha dibujada a escala para representar una

cantidad vectorial.

Regla del equilibrio. Para cualquier objeto o sistema de

objetos en equilibrio, la suma de las fuerzas que actúan es

Cantidad vectorial. Cantidad que tiene ambas, magnitud y

igual a cero. En forma de ecuación, g *F* 0.

dirección, como la fuerza.

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N)

La mayor parte de los capítulos de este libro termina con una serie de de las tareas de Piensa y clasifica, que te motivan a analizar y compa-preguntas, actividades, problemas y ejercicios. Las Preguntas concep-

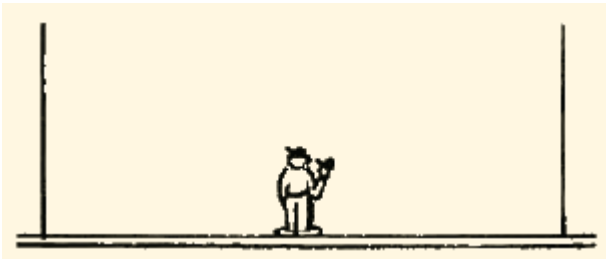
rar las magnitudes de varias cantidades. Las actividades de fin de capí-

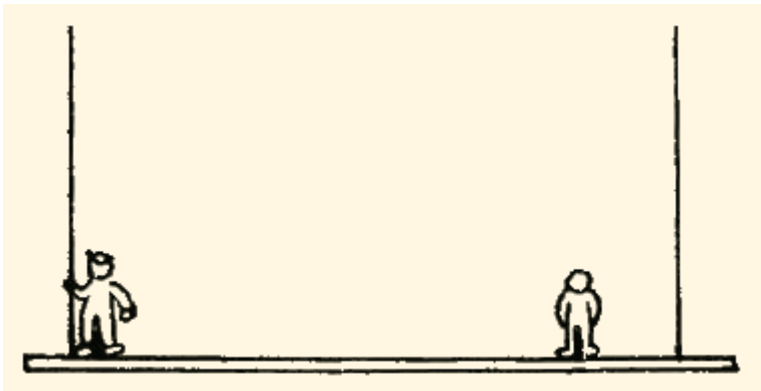
tuales están diseñadas para ayudarte a comprender las ideas y

captar tulo más importantes son los ejercicios Piensa y explica, que resaltan la esencia del material del capítulo. Observarás que las respuestas a las la síntesis de material y se centran en el pensamiento más que en el mero preguntas pueden encontrarse dentro de los capítulos. Las actividades recuerdo de información. A menos que abarques sólo algunos capítulos

Piensa y realiza se centran en aplicaciones prácticas (en este capítulo en tu curso, es probable que se espere que abordes sólo algunos de estos no hay ninguna de estas actividades). Los problemas simples de un ejercicios por cada capítulo. A continuación se encuentran las preguntas solo paso, Sustituye y listo, son para que te familiarices con las ecua-

Piensa y discute que, como su nombre lo dice, tienen la intención de ciones (en este capítulo no hay este tipo de problemas). Tus habilidades suscitar discusiones con tus compañeros de clase. ¡Ponte tu gorra de pen-matemáticas se aplican en los problemas de Piensa y resuelve, seguidos sar y comienza!





C A PÍ T U LO 2 R E V ISI Ó N

35

2.1 Aristóteles en movimiento

1. ¿Qué clase de movimiento, natural o violento, atribuía Aristóteles al movimiento de la Luna?

2. ¿Qué estado de movimiento atribuía Aristóteles a la Tierra?

3. ¿Qué relación formuló Copérnico entre el Sol y la Tierra?

2.2 Los experimentos de Galileo

4. ¿Qué descubrió Galileo en su legendario experimento en la torre inclinada de Pisa?

15. ¿Cuál es la fuerza neta sobre un objeto del que se tira con fuerzas de 80 newtons hacia la derecha y 80 newtons hacia la izquierda?

16. ¿Cuál es la fuerza neta sobre una bolsa jalada hacia abajo por la gravedad con una fuerza de 18 newtons y jalada hacia arriba por una soga con una fuerza de 18 newtons?

17. ¿Qué quiere decir que un objeto está en equilibrio mecánico?

18. Enuncia con notación simbólica la regla del equilibrio para fuerzas.

5. ¿Qué descubrió Galileo acerca de los cuerpos en movimiento y la fuerza en sus experimentos con planos inclinados?

2.6 Fuerza de sostén

6. ¿La inercia es la *razón* por la que los objetos en movimiento mantienen el movimiento o el *nombre* dado a esta propiedad?

19. Piensa en un libro que pesa 15 N en reposo sobre una mesa plana. ¿Cuántos newtons de fuerza de sostén proporciona la mesa? ¿Cuál es la fuerza neta sobre el libro en este caso?

20. Cuando estás de pie en reposo sobre una báscula de baño, ¿cómo se compara tu peso con la fuerza de sostén de la báscula?

2.3 Primera ley de Newton de movimiento

7. ¿Cómo se relaciona la primera ley de Newton con el concepto de inercia de Galileo?

2.7 Equilibrio de cosas en movimiento

8. ¿Qué tipo de trayectoria sigue un objeto en movimiento en ausencia de una fuerza?

21. Una bola de boliche en reposo está en equilibrio. ¿La bola está en equilibrio cuando se mueve con rapidez constante en línea recta?

2.4 Fuerza neta y vectores

9. ¿Cuál es la fuerza neta sobre un carro que se tira hacia la

22. ¿Cuál es la fuerza neta sobre un objeto en equilibrio

derecha con 100 libras y hacia la izquierda con 30 libras de

estático o dinámico?

fuerza?

23. Si empujas una caja con una fuerza de 100 N y ésta se

10. ¿Por qué se dice que la fuerza es una cantidad vectorial?

desliza con velocidad constante, ¿cuánta es la fuerza de

11. De acuerdo con la regla del paralelogramo, ¿qué cantidad

fricción que actúa sobre la caja?

está representada por la diagonal de un paralelogramo

2.8 La Tierra en movimiento

construido?

12. ¿Cuál es la resultante de un par de fuerzas de una libra en

24. ¿Qué concepto no se entendió en el siglo XVI, cuando las

ángulo recto?

personas no podían concebir una Tierra en movimiento?

13. Piensa en Nellie que cuelga en reposo en la Figura 2.11.

25. Un ave se posa en un árbol que viaja a 30 km/s en relación

Si las sogas fuesen verticales, sin ángulo involucrado,

con el Sol lejano. Cuando el ave desciende al suelo,

¿cuál sería la tensión en cada soga?

¿todavía se mueve a 30 km/s o esta rapidez se vuelve cero?

26. Párate junto a una pared que viaja a 30 km/s en relación

2.5 La regla del equilibrio

con el Sol. Con los pies en el suelo, tú también viajas a los

14. ¿La fuerza puede expresarse en unidades de libras y

mismos 30 km/s. ¿Mantienes esta rapidez cuando tus pies

también en unidades de newtons?

dejan el suelo? ¿Qué concepto apoya tu respuesta?

P I E N S A Y R E S U E L V E (A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 27. Lucy Piesligeros está parada con un pie en una báscula

30. Un andamio diferente, que pesa 400 N, soporta dos

de baño y el otro pie en una segunda báscula de baño. La

pintores, uno de 500 N y otro de 400 N. La lectura

lectura de cada báscula es de 350 N. ¿Cuál es el peso de

de la báscula izquierda es de 800 N. ¿Cuál es la lectura de

Lucy?

la báscula de la derecha?

28. Henry Pesopesado pesa 1,200 N y se para sobre un par

de básculas de baño de modo que una báscula lee el doble

que la otra. ¿Cuáles son las lecturas de las básculas?

800 N

29. El dibujo muestra el andamio de un pintor en equilibrio

mecánico. La

?

persona que está en

medio del andamio

400 N

400 N

pesa 500 N y las

tensiones en cada

soga son de 400 N.

¿Cuál es el peso del

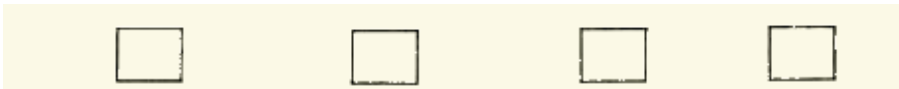
400 N

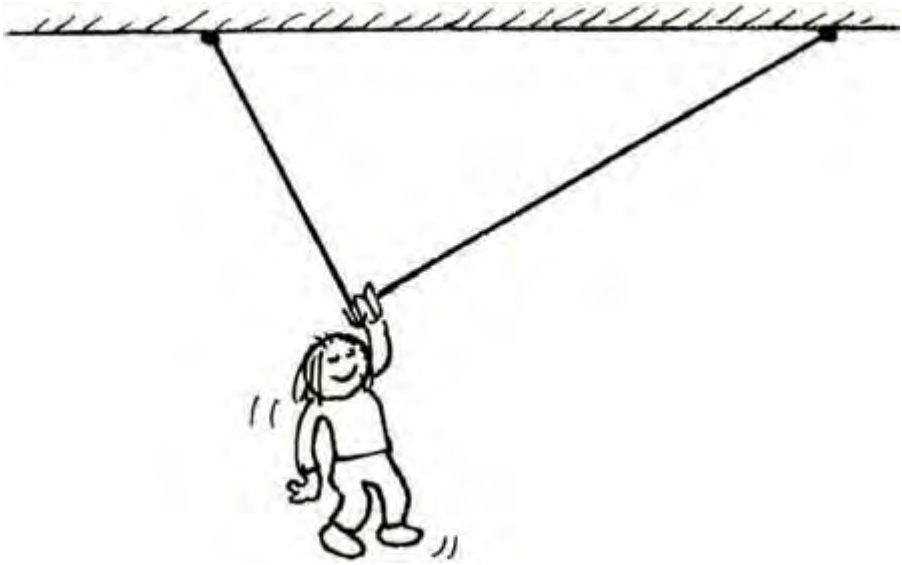
400 N

500 N

500 N

andamio?





36

PA R T E U N O

M EC Á N I C A

P I E N S A Y C L A S I F I C A (A N Á L I S I S)

31. Los pesos de Burl, Paul y el andamio producen tensiones

b.

De mayor a menor, clasifica las fuerzas necesarias

en las sogas de sostén. Clasifica las tensiones en la soga

para detenerlos en el mismo intervalo de tiempo.

***izquierda,* de mayor a menor, en las tres situaciones, A, B**

y C.

2 m/s

4 m/s

6 m/s

A

B

C

A

B

C

35. Visto desde arriba, un tocón es jalado con un par de sogas, cada una con una fuerza de 200 N, pero en

32. Clasifica las fuerzas netas sobre los cubos, de menor a diferentes ángulos, como se muestra. De mayor a menor, mayor, en las cuatro situaciones, A, B, C y D.

clasifica las fuerzas netas sobre los tocones.

10 N A 5 N 7 N

3 N 12 N

4 N 3 N

3 N

B

C

D

33. Diferentes materiales, A, B, C y D, descansan sobre una mesa.

a.

De mayor a menor, clasifícalos por cuánto resisten a

A

B

C

que se les ponga en movimiento.

b.

De mayor a menor, clasifica las fuerzas de sostén

36. Nellie cuelga inmóvil, con una mano, de un tendedero.

(normal) que ejerce la mesa sobre ellos.

¿Cuál lado del tendedero, a o b, tiene mayor tensión?

12 kg arena

10 kg agua

2 kg almohada

15 kg hierro

(a)

(b)

A

B

C

D

34. Tres discos, A, B y C, se muestran deslizándose por el hielo con las rapideces anotadas. Las fuerzas de fricción del aire y del hielo son insignificantes.

a.

De mayor a menor, clasifica las fuerzas necesarias para mantenerlos en movimiento.

P I E N S A Y E X P L I C A (S Í N T E S I S)

Por favor: no te sientas intimidado por la gran cantidad de

faltaban (conceptos introducidos después por Galileo y

ejercicios de este libro. Como se mencionó antes, si el trabajo de
Newton) que habrían aclarado sus dudas?

tu curso abarca muchos capítulos, tu instructor probablemente

40. ¿Qué idea aristotélica desacreditó Galileo en su

asignará sólo algunos ejercicios de cada uno.

legendaria demostración en la torre inclinada?

37. El conocimiento se puede lograr mediante lógica

41. ¿Qué idea aristotélica derribó Galileo con sus

filosófica y también mediante experimentación. ¿Cuál de

experimentos con planos inclinados?

éstas prefirió Aristóteles y cuál prefirió Galileo?

42. ¿Quién propuso primero el concepto de inercia: Galileo o

38. Una bola que rueda por el suelo no sigue rodando

Newton?

indefinidamente. ¿Esto se debe a que busca un lugar de

43. Los asteroides se han movido a través del espacio

reposo o a que alguna fuerza actúa sobre ella? Si es lo

durante miles de millones de años. ¿Qué los mantiene en

último, identifica la fuerza.

movimiento?

39. Copérnico postuló que la Tierra se mueve alrededor

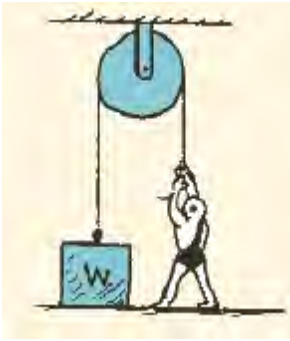
44. Una sonda espacial puede transportarse en un cohete

del Sol (en lugar de la manera contraria), pero tuvo

hacia el espacio exterior. ¿Qué mantiene el movimiento

problemas con esta idea. ¿Qué conceptos de mecánica le

de la sonda después de que el cohete ya no la empuja?



C A PÍ T U LO 2 R E V ISI Ó N

37

45. Al hacer el truco del mantel para demostrar la inercia en

59. ¿Un objeto puede estar en equilibrio mecánico cuando

la Figura 2.4, ¿por qué es importante que jales un poco

sobre él actúa una sola fuerza distinta de cero? Explica.

hacia abajo cuando intentas retirar el mantel de debajo de

60. Cuando una bola se lanza en línea recta hacia arriba,

los platos? (¿Qué ocurre si jalas ligeramente hacia arriba?)

momentáneamente llega a detenerse en lo alto de su

46. Al arrancar una toal a de papel o una bolsa de plástico de un

trayectoria. ¿Está en equilibrio durante este breve

rol o, ¿por qué es más efectivo un fuerte tirón que uno lento?

momento? ¿Por qué sí o por qué no?

47. Si estás en un carro en reposo que es golpeado por atrás,

61. Un disco de hockey se desliza por el hielo con una rapidez

puedes sufrir una seria lesión del cuel o llamada latigazo.

constante. ¿Está en equilibrio? ¿Por qué sí o por qué no?

¿Qué tiene que ver el latigazo con la primera ley de Newton?

62. Tu amiga se sienta en reposo sobre una sil a. ¿Puedes decir

48. En términos de la primera ley de Newton (la ley de la

que ninguna fuerza actúa sobre el a? ¿O es correcto decir que

inercia), ¿cómo un reposacabezas te ayuda a protegerte

ninguna fuerza *neta* actúa sobre el a? Defiende tu respuesta.

contra el latigazo en una colisión trasera?

63. Nellie Newton cuelga en reposo de los extremos de la

49. ¿Por qué sales lanzado hacia adelante en un autobús que

soga que se muestra. ¿Cómo se compara la lectura de la

frena súbitamente? ¿Por qué sales lanzado hacia atrás

báscula con su peso?

cuando toma rapidez? ¿Qué ley se aplica aquí?

50. Piensa en un par de fuerzas, una que tenga una magnitud

de 20 N y la otra de una magnitud de 12 N. ¿Cuál es la

mayor fuerza neta posible para estas dos fuerzas? ¿Cuál es

la mínima fuerza neta posible?

51. Cuando cualquier objeto está en equilibrio mecánico, ¿qué

sería correcto decir acerca de todas las fuerzas que actúan

sobre él? ¿La fuerza neta necesariamente debe ser cero?

64. Harry el pintor se balancea año tras año en su guindola.

52. ¿Cuáles de las siguientes son cantidades escalares, cuáles

Su peso es de 500 N y la soga tiene un punto de rotura

son cantidades vectoriales y cuáles no son ninguna de ellas?

de 300 N, que él desconoce. ¿Por qué la soga no se rompe

(a) fuerza; (b) edad; (c) aceleración, y (d) temperatura.

cuando se sostiene como se muestra a la izquierda? Un

día, Harry pinta cerca de un asta de bandera y, para

53. ¿Qué sería correcto decir acerca de un par de vectores

cambiar, amarra el extremo libre de la soga al asta en

cuya suma es cero?

lugar de a su silla, como se muestra a la derecha. ¿Por qué

54. ¿Cuál es más probable que se rompa: una hamaca estirada

Harry termina tomando sus vacaciones más pronto?

firmemente entre un par de árboles o una que se pandea

más cuando te sientas en ella?

55. Una pesada ave se posa en un tendedero. ¿La tensión en el

tendedero será mayor si la cuerda se pandea mucho o si se

pandea poco?

56. La soga sostiene una linterna que pesa 50 N. ¿La tensión

en la soga es menor que, igual a o mayor que 50 N? Usa

la regla del paralelogramo para defender tu respuesta.

65. Para el sistema de poleas que se muestra, ¿cuál es el límite

superior de peso que puede levantar el hombre fuerte?

57. Un mono cuelga inmóvil al final de una liana vertical.

¿Cuáles dos fuerzas actúan sobre el mono? Si una de ellas

es mayor, ¿cuál es?

58. La soga del ejercicio 56 se coloca como se muestra y aun

así sostiene la linterna de 50 N. ¿La tensión en la soga es

menor que, igual a o mayor que 50 N? Usa la regla del paralelogramo para defender tu respuesta.

66. Si el hombre fuerte del ejercicio anterior ejerce una fuerza descendente de 800 N sobre la soga, ¿cuánta fuerza ascendente se ejerce sobre el cubo?

67. Una fuerza de gravedad jala hacia abajo sobre un libro que está en una mesa. ¿Qué fuerza impide que el libro acelere hacia abajo?

68. ¿Cuántas fuerzas significativas actúan sobre un libro en horizontal de 600 N. ¿La fuerza de fricción entre el armario reposo en una mesa? Identifica las fuerzas.

y el piso es mayor que, menor que o igual a 600 N?

69. Coloca un libro pesado sobre una mesa y la mesa empuja Defiende tu respuesta.

hacia arriba sobre el libro. ¿Por qué este empuje hacia

75. Piensa en una caja en reposo sobre el piso de una fábrica.

arriba no hace que el libro se eleve de la mesa?

Cuando un par de trabajadores comienzan a levantarla,

70. Cuando estás de pie sobre el piso, ¿el piso ejerce una

¿la fuerza de sostén sobre la caja proporcionada por el piso

fuerza hacia arriba contra tus pies? ¿Cuánta fuerza ejerce?

aumenta, disminuye o permanece igual? ¿Qué sucede con

¿Por qué no te mueves hacia arriba por esta fuerza?

la fuerza de sostén sobre los pies de los trabajadores?

71. Supón que rebotas arriba y abajo mientras te pesas en una

76. Dos personas jalan cada una con una fuerza de 300 N

báscula de baño. ¿Qué varía: la fuerza de sostén ascendente o

sobre una soga en un concurso de tirar la cuerda. ¿Cuál

la fuerza de gravedad sobre ti? ¿Por qué la lectura de tu peso se

es la fuerza neta sobre la soga? ¿Cuánta fuerza ejerce la

muestra mejor cuando estás de pie en reposo sobre la báscula?

soga sobre cada persona?

72. Un jarro vacío con peso W reposa sobre una mesa. ¿Cuál

77. Dos fuerzas actúan sobre un paracaidista que cae en el

es la fuerza de sostén que ejerce la mesa sobre el jarro?

aire: la fuerza de gravedad y la resistencia del aire. Si la

¿Cuál es la fuerza de sostén cuando se vierte agua con

caída es constante, sin ganancia ni pérdida de rapidez,

peso *w* en el jarro?

entonces el paracaidista está en equilibrio dinámico.

73. Si jalas horizontalmente una caja con una fuerza de 200 N,

¿Cómo se comparan las magnitudes de la fuerza

ésta se desliza por el piso con equilibrio dinámico. ¿Cuánta

gravitacional y de la resistencia del aire?

fricción actúa sobre la caja?

78. Un niño aprende en la escuela que la Tierra viaja a más

74. Con la finalidad de deslizar sobre el piso un pesado

de 100,000 kilómetros por hora alrededor del Sol y, en

armario con rapidez constante, ejerces una fuerza

un tono alarmado, pregunta por qué no sale disparado.

¿Cuál es tu explicación?

P I E N S A Y D I S C U T E (E V A L U A C I Ó N)

79. Para responder la pregunta "¿qué mantiene a la Tierra

87. Cuando empujas hacia abajo sobre un libro en reposo que está

moviéndose alrededor del Sol?", un amigo afirma que la

sobre una mesa, sientes una fuerza hacia arriba. ¿Esta fuerza

inercia la mantiene en movimiento. Discute y corrige

depende de la fricción? Discute y defiende tu respuesta.

la afirmación errónea de tu amigo.

88. Antes de la época de Galileo y Newton, algunos académicos

80. Tu amigo dice que la inercia es una fuerza que mantiene

ilustrados pensaban que una piedra soltada desde la punta

las cosas en su lugar, ya sea en reposo o en movimiento.

de un alto mástil de un barco en movimiento caería

¿Tú y tus compañeros de discusión están de acuerdo? ¿Por

verticalmente y golpearía la cubierta bajo el mástil a una

qué sí o por qué no?

distancia igual a cuánto se hubiera movido el barco hacia

81. Piensa en una pelota en reposo en medio de un vagón de

adelante mientras caía la piedra. A la luz de tu comprensión
juguete. Cuando el vagón se jala hacia adelante, la pelota
de la primera ley de Newton, ¿qué piensas de esto?
rueda contra la parte trasera del vagón. Discute e interpreta
89. Puesto que la Tierra gira una vez cada 24 horas, la pared
esta observación en términos de la primera ley de Newton.
oeste de tu habitación se mueve en una dirección hacia
82. Supón que estás en un vehículo en movimiento y que el
ti con una rapidez lineal que probablemente es mayor a
motor deja de funcionar. Pisas los frenos y frenas el vehículo
1,000 kilómetros por hora (la rapidez exacta depende de tu
hasta la mitad de su rapidez original . Si quitas tu pie de los
latitud). Cuando estás de frente a la pared, eres transportado
frenos, ¿el vehículo acelerará un poco o seguirá con la mitad
con la misma rapidez, de modo que no lo notas. Pero
de la rapidez original y frenará debido a fricción? Defiende
cuando saltas, y tus pies ya no están en contacto con el piso,
tu respuesta con tus compañeros de discusión.
¿por qué no te golpea la pared a alta rapidez?
83. Cuando empujas un carro, éste se mueve. Cuando dejas de
90. Si lanzas una moneda en línea recta hacia arriba mientras
empujar, llega al reposo. ¿Esto viola la ley de la inercia
viajas en tren ¿dónde aterriza la moneda cuando el
de Newton? Defiende tu respuesta.

movimiento del tren es uniforme a lo largo de una vía en
84. Cada hueso en la cadena de huesos que forman tu columna
línea recta? ¿Y cuando el tren frena mientras la moneda
vertebral está separado de sus vecinos por discos de tejido
está en el aire?
elástico. ¿Qué ocurre, entonces, cuando saltas fuertemente
91. Discute y responde la pregunta anterior para el momento
sobre tus pies desde una posición elevada? (*Sugerencia:*
cuando el tren da vuelta en una curva.
piensa en la cabeza de martil o de la Figura 2.5.) Discute por
92. La chimenea de un tren de juguete inmóvil consiste en
qué eres un poco más alto en la mañana que en la noche.
un cañón de resorte vertical que dispara una bola de
85. Comienza a rodar una bola por una pista de boliche y
acero más o menos a un metro en línea recta al aire, tan
descubrirás que se mueve un poco más lento con el tiempo.
recto que la bola siempre cae de vuelta en la chimenea.
¿Esto viola la ley de la inercia de Newton? Defiende tu
Supón que el tren se mueve con rapidez constante a lo
respuesta.
largo de la vía recta. ¿Crees que la bola todavía regresará
86. Considera la fuerza normal sobre un libro en reposo sobre
a la chimenea si se dispara desde el tren en movimiento?
una mesa. Si la mesa se inclina de modo que la superficie

¿Y si el tren gana rapidez a lo largo de la vía recta? ¿Y si

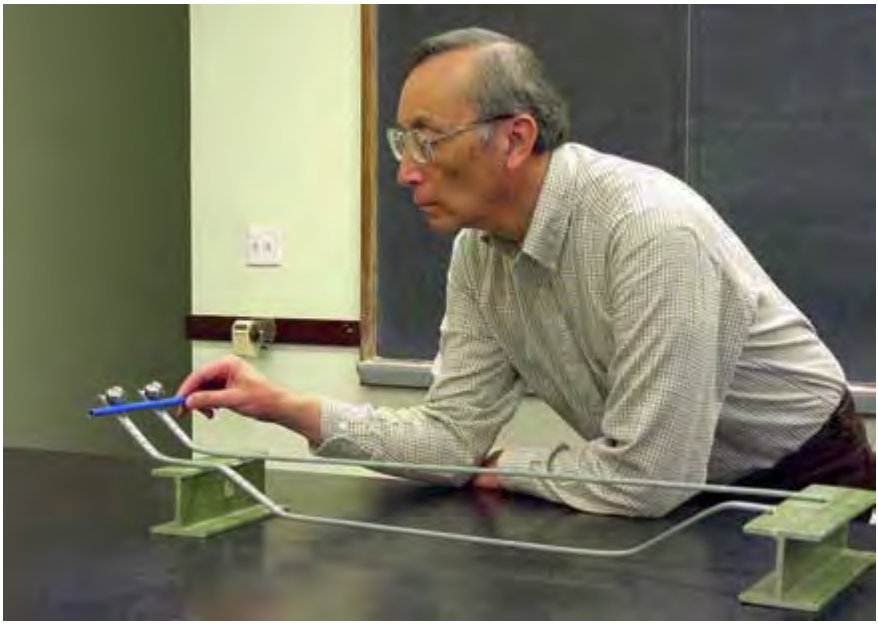
forme un plano inclinado, ¿la magnitud de la fuerza

se mueve con una rapidez constante en una vía circular?

normal cambiará? Si es así, ¿cómo?

Discute por qué difieren tus respuestas.

109



3 1

C A P Í T U L O 3

Movimiento

lineal

2

3.1

El movimiento es relativo

3.2

Rapidez

3

3.3

Velocidad

3.4

Aceleración

3.5

Caída libre

3.6

Vectores de velocidad

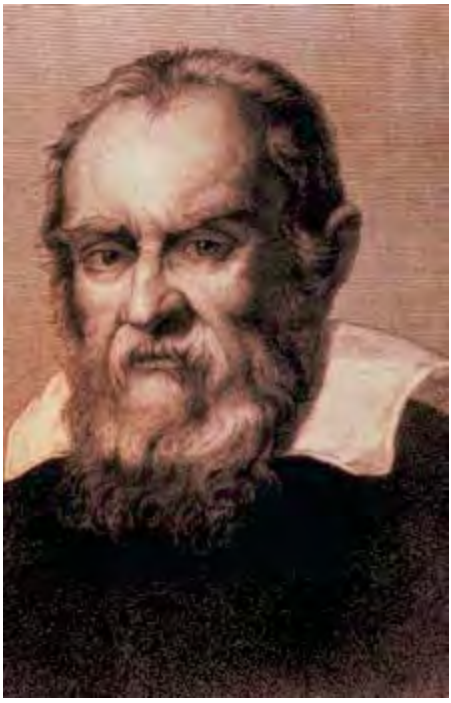
4

1 Joan Lucas se mueve con rapidez creciente cuando aumenta

la distancia que su cabal o recorre a cada segundo. 2 Lo mismo ocurre con Sue Johnson (primer remero) y su equipo, quienes ganan

medal as por gran rapidez en su bote. 3 Carl Angel , en la Universidad de Oslo, hace lo que Galileo hizo hace 400 años, pero con un

sensor fotoeléctrico de compuerta (*photogate*) que mide la rapidez de la bola. 4 Chelcie Liu pide a sus alumnos que cotejen sus razonamientos con sus vecinos y predigan cuál bola llegará primero al final de las pistas con longitudes similares.



PA

PA R T E U

U N O

M EC Á N I C A

alcanzaron amplia difusión.

Pronto se metió en problemas

En este capítulo continuamos con las ideas de un

hombre que fue sometido a arresto domiciliario

por sus ideas, el científico italiano Galileo Gali-

con la Iglesia y fue advertido

lei, quien murió el mismo año cuando nació Newton.

de no enseñar ni apoyar las

Las ideas de Galileo serían los cimientos para Isaac ideas copernicanas. Galileo Newton quien, cuando se le preguntó acerca del éxito

se contuvo de hacer públi-

que había alcanzado en ciencia, respondió que estaba co su trabajo durante casi apoyado sobre los hombros de gigantes. El más notable

15 años y después, con actitud

de ellos fue Galileo.

desafiante, publicó sus obser-

Galileo desarrolló un interés temprano por el movi-

vaciones y conclusiones, que

miento y pronto entró en conflicto con sus contemporá-

eran contrarias a la doctrina

neos, quienes apoyaban las ideas aristotélicas acerca de de la Iglesia. El resultado fue los cuerpos que caían y, por lo general, creían que el Sol

un juicio en el que se le declaró culpable y se le obligó a

giraba alrededor de la Tierra. Galileo dejó Pisa para dar renunciar a su descubrimiento de que la Tierra se movía.

clases en la Universidad de Padua y se convirtió en defen-

Se dice que, cuando salía de la corte, murmuró: “y, sin

sor de la nueva teoría copernicana del sistema solar. Fue

embargo, se mueve”. Anciano para entonces, con la salud

el primer hombre en descubrir montañas en la Luna y en

y el espíritu debilitados, Galileo fue sentenciado a arresto

encontrar las lunas de Júpiter. Puesto que publicó sus des-

domiciliario perpetuo. No obstante, concluyó sus estudios

cubrimientos en italiano, el idioma del pueblo, en lugar acerca del movimiento, y sus escritos fueron sacados de de hacerlo en latín, que era el idioma de los académicos,

contrabando de Italia y publicados en Holanda. Sus ideas

y debido a la reciente invención de la imprenta, sus ideas

sobre el movimiento son el tema de este capítulo.

3.1 El movimiento es relativo

Todo se mueve, incluso las cosas que parecen estar en reposo. Se mueven en relación con el Sol y las estrellas. Mientras lees esto, te mueves a aproximadamente 107,000 kiló -

metros por hora en relación con el Sol, y te mueves incluso más rápido en relación con el centro de la galaxia. Cuando se estudia el movimiento de algo, se describe el movimiento en relación con algo más. Si caminas por el pasillo de un autobús en mo -

vimiento, es probable que tu rapidez en relación con el suelo del autobús sea muy diferente de tu rapidez en relación con el camino. Cuando se dice que un automóvil de carreras alcanza una rapidez de 300 kilómetros por hora, se entiende que es en relación F I G U R A 3 . 1

con la pista. A menos que se diga de otra manera, cuando se estudian las rapideces de Cuando te sientas en una silla, tu rapidez

es cero en relación con la Tierra, pero es

las cosas en el entorno, se entiende que es en relación con la superficie de la Tierra. El de 30 km/s en relación con el Sol.

movimiento es relativo.

P U N T O D E C O N T R O L

Un mosquito hambriento te ve descansar en una hamaca en una brisa de 3

Si miras por la ventana de un avión

y observas a otro avión volar con

m/s. ¿Qué tan rápido y en qué dirección debe volar el mosquito para poder la misma rapidez en la dirección

flotar sobre ti y almorzar?

opuesta, lo verás volar el doble de

rápido, lo que ilustra bastante bien

el movimiento relativo.

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

El mosquito debe volar hacia ti en la brisa. Cuando esté justo sobre ti, debe volar a 3 m/s para flotar en reposo. A menos que su agarre sobre tu piel sea suficientemente fuerte después de aterrizar, debe seguir volando a 3 m/s para evitar ser arrastrado por el viento. Es por eso que la brisa impide de manera efectiva las picaduras de mosquitos.

C A PÍ T U LO 3 M OV I M I EN TO L I N E A L

41

3.2 Rapidez

Antes de la época de Galileo, las personas describían el movimiento de las cosas simplemente como “lento” o “rápido”. Tales descripciones eran vagas. Se le atribuye a Galileo VIDEO: Definición de rapidez

el mérito de ser el primero en medir la rapidez al considerar la distancia recorrida y el tiempo que tarda. Definió la rapidez como la distancia recorrida por unidad de tiempo.

Rapidez = distancia

TA B L A 3 . 1 R APIDECES

tiempo

A P ROX I M A DA S EN D I FE REN T ES

Un ciclista que recorre 16 metros en un tiempo de 2 segundos, por ejemplo, tiene una UNIDADES

rapidez de 8 metros por segundo. Es interesante mencionar que Galileo podía medir 5 m/s = 11 mi/h = 18 km/h

distancias fácilmente, pero en su época medir tiempos cortos no era asunto sencillo.

En algunas ocasiones usó su propio pulso y en otras, utilizó el conteo de gotas que 10 m/s = 22 mi/h = 36 km/h

caían de un "reloj acuático" que él mismo diseñó.

20 m/s = 45 mi/h = 72 km/h

Cualquier combinación de unidades de distancia y de tiempo es válida para medir la 30 m/s = 67 mi/h = 107 km/h

rapidez; para vehículos de motor (o distancias largas), por lo general se usan las unidades 40 m/s = 89 mi/h = 142 km/h

de kilómetros por hora (km/h) o millas por hora (mi/h o mph). Para distancias más cor-50 m/s = 112 mi/h = 180 km/h

tas es más útil metros por segundo (m/s). La diagonal (/) se lee *por* y significa "dividido entre".* En todo el libro se usarán principalmente metros por segundo (m/s). La tabla 3.1 muestra algunas rapideces aproximadas en diferentes unidades.1

Rapidez instantánea

Las cosas en movimiento con frecuencia tienen variaciones en su rapidez. Un automóvil, por ejemplo, puede viajar por una calle a 50 km/h, frenar hasta 0 km/h en una luz roja y acelerar a sólo a 30 km/h debido al tráfico. Puedes decir la rapidez del automóvil en cualquier instante si observas su velocímetro.** La rapidez en cualquier instante es la rapidez instantánea. Un automóvil que viaja a 50 km/h por lo general va a tal rapidez durante menos de 1 hora. Si efectivamente viajara a dicha rapidez por toda 1 hora, recorrería 50 km. Si continuara con dicha rapidez durante media hora, recorrería la mitad de esa F I G U R A 3 . 2

distancia: 25 km. Si continuara sólo por 1 minuto, recorrería menos de 1 km.

Un velocímetro que da lecturas tanto

en millas por hora como en kilómetros

por hora.

Rapidez promedio

Cuando planea un viaje en automóvil, el conductor con frecuencia quiere conocer el tiempo de recorrido. El conductor se preocupa por la rapidez promedio del viaje.

distancia total recorrida

Rapidez promedio =

SCREENCAST: Definiciones de

intervalo de tiempo

movimiento lineal

La rapidez promedio puede calcularse de manera muy sencilla. Por ejemplo, si conduces una distancia de 80 kilómetros en un tiempo de 1 hora, se dice que la rapidez promedio es de 80 kilómetros por hora. Del mismo modo, si recorres 320 kilómetros en 4 horas,

distancia total recorrida 320km

Rapidez promedio =

=

= 80km/h

VIDEO: Rapidez promedio

intervalo de tiempo

4h

Se observa que, cuando una distancia en kilómetros (km) se divide entre un tiempo en horas (h), la respuesta está en kilómetros por hora (km/h).

Dado que la rapidez promedio es la distancia recorrida dividida entre el tiempo total de viaje, no indica las diferentes rapideces y variaciones que pudieron ocurrir du-Si te levantan una infracción por

rante intervalos de tiempo más cortos. En la mayor parte de los viajes se experimentan exceso de rapidez, ¿qué escribe el

varias rapideces, de modo que la rapidez promedio con frecuencia es muy diferente de oficial de policía en tu infracción:

tu *rapidez instantánea* o tu *rapidez*

la rapidez instantánea en cualquier momento particular.

***promedio*?**

***N.T. En castellano la diagonal (/) también se lee "sobre" y también significa "dividido entre".**

****N.T. Aunque acaso el nombre correcto debería ser *rapidómetro*, porque el dispositivo sólo indica la *magnitud*, no la *dirección*.**

1La conversión se basa en 1 h 3,600 s, 1 mi 1,609.344 m.

Si conoces la rapidez promedio y el tiempo de viaje, la distancia recorrida se encuentra fácilmente. Un simple reordenamiento de la definición da

Distancia total recorrida rapidez promedio intervalo de tiempo

Si tu rapidez promedio es de 80 kilómetros por hora en un viaje de 4 horas, por ejemplo, recorres una distancia de 320 kilómetros (80 km/h 4 h).

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Cuál es la rapidez promedio de un guepardo que recorre 100 metros en 4 segundos? ¿Si recorre 50 m en 2 s?

2. Si un automóvil se mueve con una rapidez promedio de 60 km/h durante una hora, recorrerá una distancia de 60 km.

a. ¿Cuánto recorrerá si se mueve a esta tasa durante 4 h?

b. ¿Durante 10 h?

3. Además del velocímetro en el tablero de todo automóvil, hay un odómetro, que registra la distancia recorrida. Si la lectura inicial se pone en cero al inicio de un viaje y la lectura es de 40 km media hora después,

¿cuál fue tu rapidez promedio?

4. ¿Sería posible lograr esta rapidez promedio y nunca ir más

rápido que 80 km/h?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

(¿Estás leyendo esto antes de haber razonado tus respuestas en tu mente? Como se mencionó en el Capítulo 2, cuando encuentres preguntas de Punto de control a lo largo de este libro, comprueba tu razonamiento antes de leer las respuestas. No sólo aprenderás más, también disfrutarás más el aprendizaje.)

1. En ambos casos la respuesta es 25 m/s:

distancia recorrida

100 metros

50 metros

Rapidez promedio =

=

=

= 25 m/s

intervalo de tiempo

4 segundos

2 segundos

2. La distancia recorrida es la rapidez promedio tiempo de viaje, de modo que a. Distancia 60 km/h 4 h 240 km

b. Distancia 60 km/h 10 h 600 km

3.

distancia total recorrida

40 km

Rapidez promedio =

=

= 80 km/h

intervalo de tiempo

0.5 h

4. No, no si el viaje comienza desde el reposo. Hay momentos en los que las rapideces instantáneas son menores a 80 km/h, de modo que el conductor debe conducir a rapideces de más de 80 km/h durante uno o más intervalos de tiempo para poder promediar 80 km/h. En la práctica, las rapideces promedio suelen ser mucho menores que las rapideces instantáneas mucho más altas.

3.3

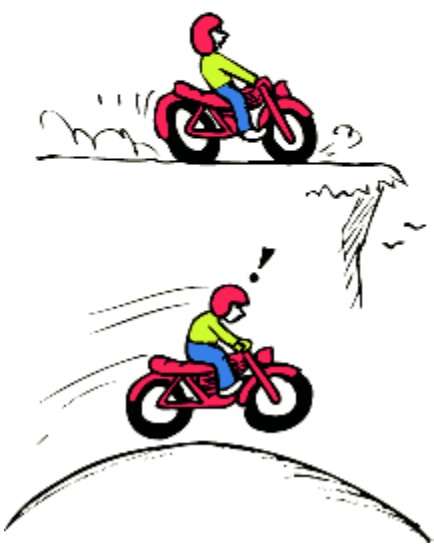
VIDEO: Velocidad

Velocidad

Cuando se conoce tanto la rapidez como la dirección de movimiento de un objeto, se conoce su velocidad. La velocidad combina las ideas de rapidez y dirección de movimiento. Por ejemplo, si un automóvil viaja a 60 km/h, se conoce su rapidez. Pero si se dice que el automóvil se mueve a 60 km/h hacia el norte, se especifica su *velocidad.*

La rapidez es una descripción de qué tan rápido; la velocidad es qué tan rápido *y* en qué dirección. Una cantidad como la velocidad, que especifica tanto dirección como VIDEO: Velocidad variable

magnitud, se llama cantidad vectorial. Recuerda del Capítulo 2 que la fuerza es una cantidad vectorial, que necesita tanto magnitud como dirección para su descripción.



Del mismo modo, la velocidad es una cantidad vectorial. Por el contrario, una cantidad que sólo requiere magnitud para su descripción se llama cantidad escalar. La rapidez es una cantidad escalar.

La velocidad es rapidez "dirigida".

Velocidad constante

Rapidez constante significa una rapidez que no cambia. Algo con rapidez constante no acelera ni frena. La velocidad constante, por otra parte, significa *tanto* rapidez constante *como* dirección constante. La dirección constante es una línea recta: la trayectoria del objeto no se curva. De modo que velocidad constante significa movimiento en línea recta con rapidez constante.

Velocidad variable

Si cambian o la rapidez o la dirección (o si cambian ambos),

entonces la velocidad cambia. Un automóvil en una pista curva, por ejemplo, puede tener una rapidez cons- F I G U R A 3 . 3

El automóvil en la pista circular puede

tante pero, dado que su dirección cambia, su velocidad no es constante. En la siguiente tener una rapidez constante, pero su velo-sección se verá que *acelera.*

cidad cambia a cada instante. ¿Por qué?

P U N T O D E C O N T R O L

1. "Ella viaja con una rapidez constante en una dirección constante." Para-frasea la misma oración con menos palabras.

2. El velocímetro de un automóvil que se mueve hacia el este indica 100 km/h.

SCREENCAST: El problema de

las bicicletas y las abejas

Pasa a otro automóvil que se mueve hacia el oeste a 100 km/h. ¿Ambos automóviles tienen la misma rapidez? ¿Tienen la misma velocidad?

3. Durante cierto periodo, el velocímetro de un automóvil lee una constante de 60 km/h. ¿Esto indica una rapidez constante? ¿Una velocidad constante?

SCREENCAST: Conversión

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

de unidades

1. "Ella se mueve con velocidad constante."

2. Ambos automóviles tienen la misma rapidez, pero tienen velocidades opuestas porque se mueven en direcciones opuestas.

3. La lectura constante del velocímetro indica una rapidez constante mas no una velocidad constante, porque el automóvil puede no estarse moviendo en una trayectoria en línea recta, en cuyo caso está acelerando.

3.4 Aceleración

Tú puedes cambiar la velocidad de algo si cambias su rapidez, si cambias su dirección o si cambias *tanto* su rapidez *como* su dirección. Qué tan rápidamente y en qué dirección cambia la velocidad es aceleración:2

cambio de velocidad

Aceleración = intervalo de tiemmpo

Uno está familiarizado con la aceleración de un automóvil. Cuando el conductor pisa el pedal de combustible (llamado adecuadamente "acelerador"), los pasajeros experimentan 2Las frases "cambio en" y "diferencia en" pueden representarse con la letra griega delta, Δ. Entonces la aceleración se puede expresar como *v* , donde Δ *v* es el cambio en velocidad y Δ *t* es el cambio correspondiente en F I G U R A 3 . 4

t

Se dice que un cuerpo experimenta ace-

tiempo. La expresión proporciona la *aceleración promedio*. La mayor parte de los movimientos acelerados que se leración cuando su velocidad cambia.

tratan en este libro serán de aceleración constante.

aceleración (o “acelerones”, como a veces se les llama) conforme se presionan contra sus asientos. La idea clave que define la aceleración es el *cambio.* Supón que conduces y, en 1 segundo, aumentas de manera estable tu velocidad de 30 kilómetros por hora a 35 kilómetros por hora, y luego a 40 kilómetros por hora el segundo siguiente, a 45 en VIDEO: Definición de aceleración

el siguiente segundo, y así por el estilo. Cambias la velocidad 5 kilómetros por hora cada segundo. Este cambio de velocidad es lo que se entiende por aceleración.

cambio de velocidad 5km/h

Aceleración =

=

= 5km/h • s

intervalo de tiempo

1s

En este caso, la aceleración es 5 kilómetros por hora segundo (abreviado 5 km/h · s), VIDEO: Ejemplo numérico

en la dirección hacia adelante. Observa que una unidad de tiempo entra dos veces: de aceleración

una vez para la unidad de velocidad y de nuevo para el intervalo

de tiempo en el que cambia la velocidad. Observa también que la aceleración no sólo es el cambio total de velocidad; es la *tasa de cambio en el tiempo,* o el *cambio por segundo*, en velocidad.

P U N T O D E C O N T R O L

1. Un automóvil determinado puede ir desde el reposo hasta 90 km/h en 10 s. ¿Cuál es su aceleración?

2. En 2.5 s, un automóvil aumenta su rapidez de 60 a 65 km/h en tanto que una bicicleta va del reposo a 5 km/h. ¿Cuál experimenta la mayor aceleración? ¿Cuál es la aceleración de cada uno?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. La aceleración es 9 km/h · s. Hablando estrictamente, esta sería su aceleración promedio, pues puede haber cierta variación en su tasa para adquirir rapidez.

F I G U R A 3 . 5

2. Las aceleraciones tanto del automóvil como de la bicicleta son iguales: 2 km/h · s.

La desaceleración rápida la siente el

v

65 km/h − 60 km/h 5 km/h

conductor, quien da un tumbo hacia

Aceleraciónautomóvil =

=

=

= 2 km/h • s

t

2.5 s

2.5 s

adelante (de acuerdo con la primera ley

de Newton).

v

5 km/h − 0 km/h 5 km/h

Aceleraciónbicicleta =

=

=

= 2 km/h • s

t

2.5 s

2.5 s

Aunque las velocidades son muy diferentes, las tasas de *cambio* de velocidad son las mismas. Por tanto, las aceleraciones son iguales.

El término *aceleración* se aplica tanto para reducciones como para aumentos de velocidad. Se dice que los frenos de un automóvil, por ejemplo, producen grandes aceleraciones retardadoras; esto es: hay una gran reducción por segundo en la velocidad

¿Puedes ver que un automóvil

del automóvil. Con frecuencia a esto se le llama *desaceleración.* La desaceleración se tiene tres controles que cambian

la velocidad: el pedal de combus-

experimenta cuando el conductor de un autobús o un automóvil aplica los frenos y uno tible (acelerador), los frenos y el

tiende a dar un tumbo hacia adelante.

volante?

Uno acelera siempre que avanza sobre una trayectoria curva, incluso si se mueve con rapidez constante, porque la dirección cambia cada instante; en consecuencia, la velocidad cambia. Por esta razón se distinguen rapidez y velocidad, y la *aceleración* se define como la tasa a la que cambia la velocidad, lo que en consecuencia abarca cambios tanto de rapidez como de dirección.

Quienquiera que haya estado de pie en un autobús atiborrado de gente habrá experimentado la diferencia entre velocidad y aceleración. Excepto por los efectos de un camino con baches, puedes ponerte de pie sin esfuerzo adicional dentro de un autobús que se mueve con velocidad constante, sin importar qué tan rápido vaya. Puedes lanzar una moneda y atraparla exactamente como si el autobús estuviera en reposo. Sólo cuando el autobús acelera (adquiere rapidez, frena o da vuelta) experimentas dificultad para ponerte de pie.

C A PÍ T U LO 3 M OV I M I EN TO L I N E A L

45

En gran parte de este libro sólo se abordará el movimiento a lo largo de una línea recta. Cuando se considera el movimiento en línea recta en un sentido, es común usar los términos *rapidez* y *velocidad* de manera indistinta. Cuando la dirección no cambia, la aceleración puede expresarse como la tasa a la que cambia la *rapidez*.

cam

Aceleración (a lo largo de una línea recta) =

bio de rapidez

intervalo de tiempo

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Cuál es la aceleración de un automóvil de carreras que te rebasa zumbando con una velocidad constante de 400 km/h?

2. ¿Cuál tiene mayor aceleración: un avión que pasa de 1,000 km/h a 1,005 km/h en 10 segundos, o un patinador que pasa de cero a 5 km/h en 1 segundo?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. Cero, porque su velocidad no cambia.

2. Ambos ganan 5 km/h, pero el patinador lo hace en un décimo del tiempo. Por tanto, el patinador tiene mayor aceleración; de hecho, 10 veces mayor. Un poco de cálculo mostrará que la aceleración del avión es 0.5 km/h · s, en tanto que la aceleración del patinador, que se mueve más lento, es de 5 km/h · s. Velocidad y aceleración son conceptos muy diferentes. Distinguirlos es muy importante.

Aceleración sobre los planos inclinados de Galileo

Galileo creó el concepto de aceleración en sus experimentos sobre planos inclinados.

Su principal interés eran los objetos en caída, y, puesto que carecía de dispositivos de cronometrado exacto, usó planos inclinados de manera efectiva para frenar el movimiento acelerado e investigarlo más cuidadosamente.

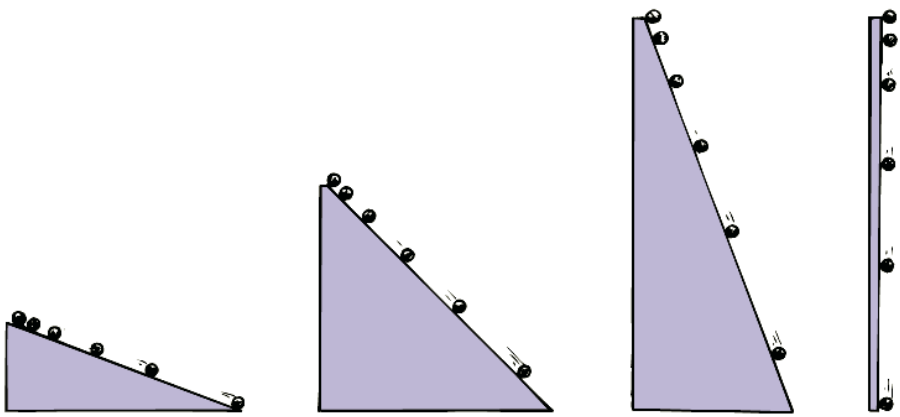
Galileo descubrió que una bola que rueda hacia abajo sobre un plano inclinado adquiere la misma cantidad de rapidez en segundos sucesivos; esto es, la bola rueda con aceleración invariable: aceleración constante. Por ejemplo, puede observarse que una bola que rueda hacia abajo sobre un plano inclinado en cierto ángulo adquiere una rapidez de 2 metros por segundo por cada segundo que rueda. Este aumento por segundo es su

aceleración. Su velocidad instantánea a intervalos de 1 segundo, con esta aceleración, es entonces 0, 2, 4, 6, 8, 10, etc., metros por segundo. Puedes ver que la rapidez instantánea o velocidad de la bola en cualquier momento dado después de soltarla del reposo es simplemente igual a su aceleración multiplicada por el tiempo:3

Velocidad adquirida aceleración tiempo

Si sustituyes la aceleración de la bola en esta relación (2 metros por segundo al cuadrado), puedes ver que, al final de 1 segundo, la bola viaja a 2 metros por segundo; al final de 2 segundos, viaja a 4 metros por segundo; al final de 10 segundos, viaja a 20 metros por segundo; etc. La rapidez o velocidad instantánea en cualquier momento es igual a la aceleración multiplicada por el número de segundos que ha acelerado.

3Observa que esta relación se deriva de la definición de aceleración. Para una bola que parte del reposo, $a \Delta v/\Delta t$ puede escribirse como $a\ v/\ t$, que luego puede reordenarse (al multiplicar ambos lados de la ecuación por t) como $v\ at$.



F I G U R A 3 . 6

Cuanto mayor sea la pendiente del plano

inclinado, mayor será la aceleración de la

bola. ¿Cuál es la aceleración de la bola si

cae verticalmente?

Galileo descubrió que las aceleraciones en cada plano inclinado eran constantes por Qué bien: la aceleración de la

cada inclinación; las más grandes eran para los planos más inclinados. La bola alcanza gravedad es 10 m/s cada segundo

su máxima aceleración cuando el plano se pone verticalmente. Entonces cae con la todo el tiempo. ¿Por qué esto es

aceleración de un objeto en caída (Figura 3.6). Sin importar el peso o el tamaño del así, para cualquier masa?, lo sabrás

objeto, Galileo descubrió que, cuando la resistencia del aire es suficientemente peque-en el Capítulo 4.

ña como para despreciarse, todos los objetos caen con la misma aceleración invariable.

3.5 Caída libre

Qué tan rápido

Las cosas caen debido a la fuerza de gravedad. Cuando un objeto que cae está libre de toda restricción (ninguna fricción, con el aire o de otra índole) y cae bajo la influencia SCREENCAST: Caída libre

de la gravedad sola, el objeto está en un estado de caída libre. (En el Capítulo 4 se considerarán los efectos de la resistencia del aire sobre los objetos en caída.) La Tabla 3.2 muestra las rapideces instantáneas de un objeto en caída libre a intervalos de

un segundo. Lo importante que se debe observar en estos números es la forma en la que cambia la rapidez. *Durante cada segundo de caída, el objeto gana una rapidez de 10 metros por segundo.* Esta ganancia por segundo es la aceleración. La aceleración de caída libre es aproximadamente igual a 10 metros por segundo cada segundo, o, en notación abreviada, 10 m/s2 (que se lee como 10 metros por segundo al cuadrado).

Observa que la unidad de tiempo, el segundo, entra dos veces: una vez para la unidad de rapidez y de nuevo para el intervalo de tiempo durante el cual cambia la rapidez.

T A B L A 3 . 2

C A Í DA L I B RE

En el caso de objetos en caída libre se acostumbra usar la letra *g* para representar la DESDE EL

RE P OSO

aceleración (porque la aceleración es debida a la *gravedad*). El valor de *g* es muy diferente sobre la superficie de la Luna y sobre las superficies de otros planetas. Aquí, sobre Tiempo

de caída

Velocidad adquirida

la Tierra, *g* varía un poco en diferentes ubicaciones, con un valor promedio igual a (segundos)

(metros/segundo)

9.8 metros por segundo cada segundo o, en notación abreviada, 9.8 m/s2. Aquí y en la 0

0

Tabla 3.2 se redondea a 10 m/s2 para que las ideas se comprendan mejor; los múltiplos 1

10

de 10 son más claros que los múltiplos de 9.8. Donde las cifras exactas sean importantes, deberá usarse el valor de 9.8 m/s2.

2

20

Observa en la Tabla 3.2 que la rapidez o velocidad instantánea de un objeto que cae 3

30

desde el reposo coincide con la ecuación que Galileo dedujo con sus planos inclinados: 4

40

Velocidad adquirida aceleración tiempo

5

50

La velocidad instantánea *v* de un objeto que cae desde el reposo4 después de un tiempo

.

.

***t* puede expresarse en notación abreviada como**

.

.

v gt

.

.

t

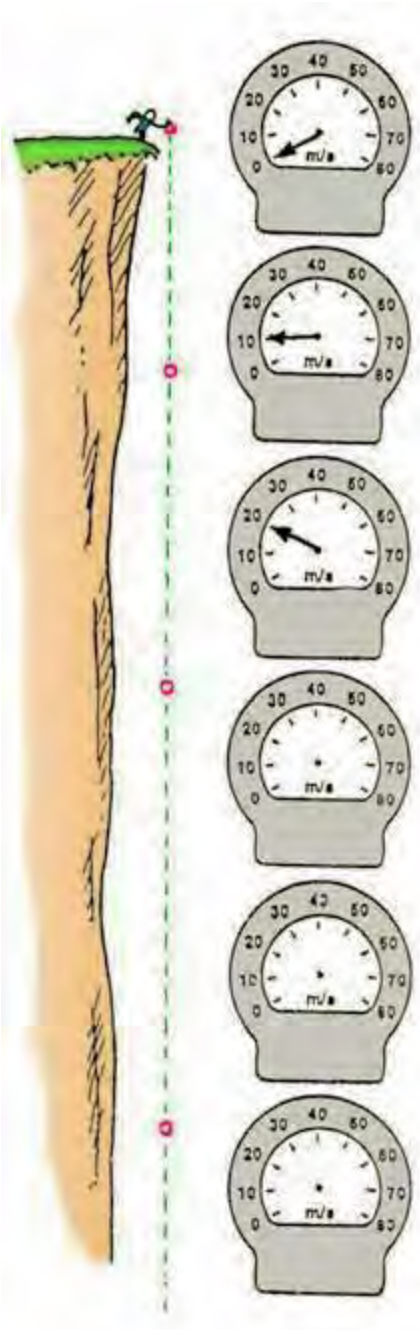
10 *t*

4Si, en lugar de soltarse desde el reposo, el objeto se lanza hacia abajo con una rapidez *v* , la rapidez *v* después de 0

cualquier tiempo transcurrido es *v v at v gt*, con la dirección positiva hacia arriba.

0

0



C A PÍ T U LO 3 M OV I M I EN TO L I N E A L

47

Para ver que esta ecuación tiene perfecto sentido, tómate un momento para verificarla con la Tabla 3.2. Observa que la velocidad o rapidez instantánea en metros por segundo es simplemente la aceleración $g = 10$ m/s2 multiplicada por el tiempo t en segundos.

La aceleración de caída libre es más clara cuando se consideran objetos que caen $t = 0$ s

equipados con un velocímetro (Figura 3.7). Supón que una roca se suelta desde un alto risco y tú la observas con un telescopio. Si enfocaras el telescopio sobre el velocímetro, observarías que la rapidez crece con el tiempo. ¿Cuánto aumenta? La respuesta es: 10 m/s cada segundo sucesivo.

$t = 1$ s

P U N T O D E C O N T R O L

$t = 2$ s

¿Cuál sería la lectura en el velocímetro de la roca que cae en la Figura 3.7, 5 s después de que se suelta desde el reposo? ¿Y 6 s después de que se suelta? ¿6.5 s después de soltarla?

$t = 3$ s

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Las lecturas del velocímetro serían 50 m/s, 60 m/s y 65 m/s, respectivamente. Puedes razonar esto a partir de la Tabla 3.2 o usar la ecuación $v = gt$, donde g es 10 m/s2.

$t = 4$ s

Hasta el momento se han considerado objetos que se mueven en línea recta hacia abajo en la dirección del jalón de la gravedad. ¿Y qué hay de los objetos lanzados de $t = 5$ s

manera recta hacia arriba? Una vez soltados, siguen moviéndose hacia arriba durante algún tiempo y luego regresan hacia abajo. En el punto más alto del movimiento del objeto, cuando cambia su dirección de arriba hacia abajo, su rapidez instantánea es F I G U R A 3 . 7

cero. Entonces comienza a bajar *como si se hubiera soltado desde el reposo en dicha altura.* Imagina que una roca que cae está Durante la parte ascendente de este movimiento, el objeto frena a medida que sube. equipada con un velocímetro. En cada segundo sucesivo de caída, observarías

No debe sorprenderte que frene a la tasa de 10 metros por segundo cada segundo, la que la rapidez de la roca aumenta en la misma aceleración que experimenta en su camino hacia abajo. De modo que, como misma cantidad: 10 m/s. Dibuja la aguja muestra la Figura 3.8, la rapidez instantánea en puntos de igual elevación en la trayec- del velocímetro que falta en $t = 3$ s, 4 s toria es la misma ya sea que el objeto se mueva hacia arriba o hacia abajo. Desde luego, y 5 s. (La Tabla 3.2 muestra las rapideces las velocidades son opuestas, porque están en direcciones opuestas. Observa que las ve- que leerías en varios segundos de caída.) locidades descendentes tienen un signo negativo, que indica la dirección descendente (se acostumbra llamar positivo *arriba* y negativo *abajo*). Ya sea que el objeto se mueva hacia arriba o hacia abajo, su aceleración es 10 m/s2 todo el tiempo.

P U N T O D E C O N T R O L

VIDEO: Caída libre:

Una bola es lanzada recto hacia arriba y abandona tu mano a 20 m/s. ¿Qué

¿qué tan rápido?

predicciones puedes hacer acerca de la bola? (Por favor, ¡piénsalo *antes* de leer las predicciones sugeridas!)

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Existen varias. Una predicción es que la bola frenará a 10 m/s 1 segundo después de VIDEO: *v* 5 *gt*

abandonar tu mano y llegará a un alto momentáneo 2 segundos después de abando-narla, cuando llegue al pico de su trayectoria. Esto se debe a que pierde 10 m/s cada segundo al subir. Otra predicción es que 1 segundo después, 3 segundos en total, se moverá hacia abajo a 10 m/s. En otro segundo, regresará a su punto de partida y se moverá a 20 m/s. De modo que el tiempo de cada ruta es 2 segundos, y su tiempo total en vuelo es de 4 segundos. Ahora verás cuánta distancia recorre hacia arriba y VIDEO: Caída libre: ¿cuánto recorre?

hacia abajo.

3 s

Velocidad = 0

Qué tan lejos

La distancia que *recorre* un objeto que cae es completamente diferente a qué tan *rápido* 2 s 4 s

cae. Con sus planos inclinados, Galileo descubrió que la distancia que recorre un obje-v = 10 m/s

v = –10 m/s

to que acelera de manera uniforme es proporcional al *cuadrado del tiempo*. La distancia recorrida por un objeto que acelera de manera uniforme y parte del reposo es: 1

Distancia recorrida = (aceleración × tiempo × tiempo)

1 s

5 s

2

v = 20 m/s *v* = –20 m/s

Esta relación se aplica a la distancia de algo que cae. Se puede expresar, para el caso de un objeto que cae libremente, en notación abreviada como:

1

d

gt 2

= 2

0 s

6 s

donde *d* es la distancia que un objeto cae cuando el tiempo de caída en segundos se $v = 30$ m/s

$v = -30$ m/s

sustituye por *t* y se eleva al cuadrado.5 Si usas 10 m/s2 para el valor de *g,* la distancia que cae en varios tiempos será como se muestra en la Tabla 3.3.

Observa que un objeto cae una distancia de sólo 5 metros durante el primer segundo de caída, aunque su rapidez entonces sea de 10 metros por segundo. Esto puede ser confuso, porque puedes pensar que el objeto debe caer una distancia de 10 metros. Pero para que caiga 10 metros en su primer segundo de caída, debería caer con una rapidez *promedio* de 10 metros por segundo durante todo el segundo. Comienza su caída a 0 metros por segundo, y su rapidez es de 10 metros por segundo sólo en el último instante del intervalo de 1 segundo. Su rapidez promedio durante este intervalo es el promedio de sus rapideces inicial y final, 0 y 10 metros por segundo. Para encontrar el valor promedio de éstos o cualesquiera dos números, simplemente suma los dos números y divide el 7 s

total entre 2. Esto es igual a 5 metros por segundo, que, en el transcurso del intervalo $v = -40$ m/s

de tiempo de 1 segundo, da una distancia de 5 metros. A medida que el objeto siga cayendo en segundos sucesivos, caerá distancias que irán creciendo, porque su rapidez F I G U R A 3 . 8

aumenta de manera continua.

La tasa a la que cambia la velocidad cada

segundo es la misma.

P U N T O D E C O N T R O L

Un gato baja de una repisa y cae al suelo en 1/2 segundo.

a. ¿Cuál es su rapidez al golpear el suelo?

b. ¿Cuál es su rapidez promedio durante el 1/2 segundo?

c. ¿Cuán alta está la repisa del suelo?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

T A B L A 3 . 3

D ISTA N C I A

a. Rapidez: *v* 5 *gt* 5 10 m/s2 3 1/2 s 5 5 m/s RECO R R I DA

EN C A Í DA

b.

***v* inicial *v* final 0 m/s + 5 m**

m/s

Rapidez promedio: *v* =

+

=

= 2.5 m/s

2

2

L I B RE

Para denotar rapidez promedio, se coloca una barra sobre el símbolo: *v* Tiempo de caída

Distancia que cae

c. Distancia: *d* 5 *vt* 5 2.5 m/s 3 1/2 s 5 1.25 m (segundos)

(metros)

O, de manera equivalente,

0

0

1

5

$d = 1\ gt$

2

2

$= 1 \times 10$ m/s2 $\times$ (1s

2) $= 1.25$ m

2

2

2

20

Observa que es posible encontrar la distancia a partir de cualquiera de estas relacio-3

45

nes equivalentes.

4

80

5Distancia que cae desde el reposo: $d =$ velocidad promedio $\times$ tiempo 5

125

velocidad inicial + velocidad final

.

.

$d =$

$\times$ tiempo

2

.

.

$0 + gt$

$d =$

$\times t$

2

.

.

1

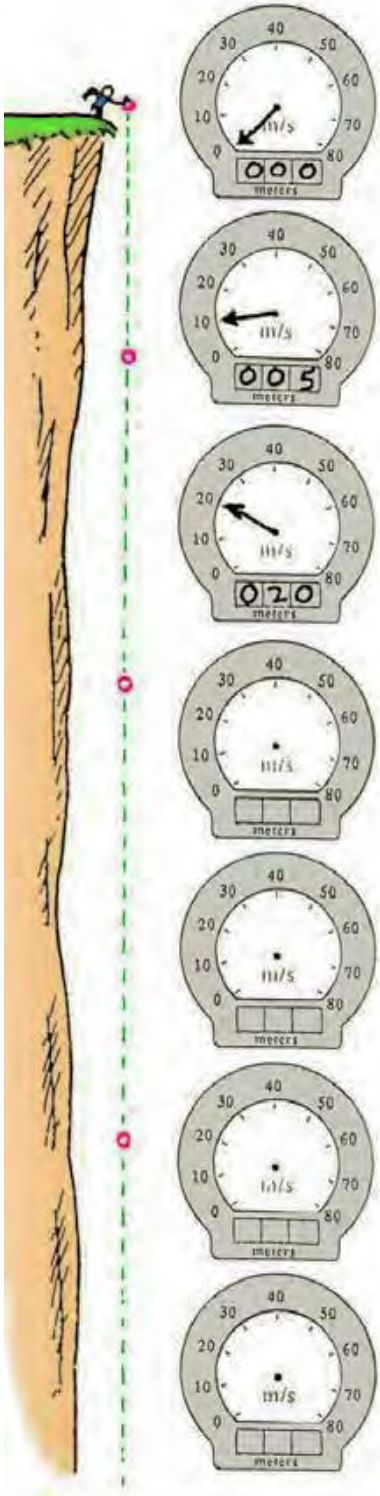
$d = gt$ 2

t

10 t 2

2

(Consulta el Apéndice B para más explicación.)


0
10
20
30
40
50
60
70
80
m/s
meters
000
005
020

C A PÍ T U LO 3 M OV I M I EN TO L I N E A L

49

Es frecuente observar que muchos objetos caen con aceleraciones desiguales. Una hoja de árbol, una pluma o una hoja de papel pueden revolotear en su camino al suelo lentamente. Se puede $t = 0$ s demostrar muy bien que estas aceleraciones tan diferentes se deben a la resistencia del aire, con un tubo de vidrio cerrado que contenga objetos ligeros y pesados: una pluma y una moneda, por ejemplo. En presencia de aire, la pluma y la $t = 1$ s moneda caen con aceleraciones muy diferentes. Pero, si se saca el aire del tubo mediante una

bomba de vacío y el tubo se voltea rápidamente, la

pluma y la moneda caen con la misma aceleración

(Figura 3.10). Aunque la resistencia del aire altera

***t* = 2 s de manera considerable el movimiento de las**

cosas, como las plumas que caen, el movimiento

de los objetos más pesados, como las F I G U R A 3 .1 0

pelotas de béisbol, a rapideces bajas ordinarias, Una pluma y una moneda caen con no se modifican mucho por el aire. Las relaciones iguales aceleraciones en un vacío.

***t* = 3 s *v* 5 *gt* y *d* 5 1/2 *gt* 2 pueden servir para obtener una muy buena aproximación en casi todos los**

objetos que caen en aire desde una posición

inicial de reposo.

***t* = 4 s**

Rapidez = distancia

tiempo

Tiempo = 1 hora

San Francisco

Livermore

Rapidez = 80 km = 80 km/h

***t* = 5 s**

1 h

Velocidad =

rapidez *y*

dirección

t = 6 s

San Francisco

E

F I G U R A 3 . 9

Velocidad = 300 km/h, este

Imagina que una roca que cae está equipada

con un velocímetro y un odómetro. Cada

tasa de

segundo, las lecturas de la rapidez aumentan

cambio de rapidez

en 10 m/s y las lecturas de distancia en

Aceleración =

cambio de *debida a*

y/o dirección

1/2 *gt* 2. ¿Puedes completar las lecturas de las

velocidad

posiciones del velocímetro y el odómetro?

40 km/h

40 km/h 80 km/h 0 km/h

40 km/h

Cambio de rapidez,

Cambio de dirección,

Cambio de rapidez

VIDEO: Resistencia del aire y objetos

pero *no* de dirección

pero *no* de rapidez

***y* de dirección**

que caen

cambio de velocidad

Aceleración =

tiempo

20 m/s

Tiempo = 0, velocidad = 0

Aceleración =

Tiempo = 1 s, velocidad = 10 m/s

2 s

m/s

VIDEO:

***a* = 10 s**

Distancia de caída

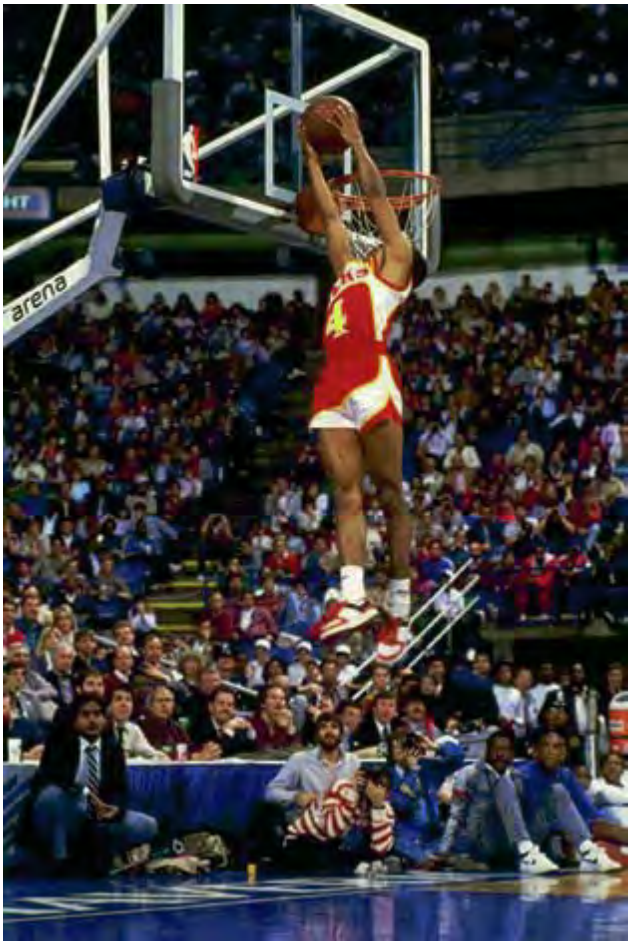
***a* = 10 m/s · s**

F I G U R A 3 . 1 1

Análisis de movimiento.

Tiempo = 2 s, velocidad = 20 m/s

***a* = 10 m/s2**



50

PA R T E U N O

M EC Á N I C A

TIEMPO “DE VUELO”

Algunos deportistas y bailarines tienen una gran habilidad La relación entre el para saltar. Al alzarse de un salto, parecen “flotar en el aire”

tiempo de subida o de

y desafiar la gravedad. Pide a tus amigos estimar el “tiempo

bajada y la altura vertical

de vuelo" de los grandes saltadores: el tiempo que un saltador está

está dada por:

en el aire con los pies despegados del suelo. Pueden decir que 2

1

o 3 segundos. Pero, sorprendentemente, ¡el tiempo en el aire de

d

gt **2**

$=$ **2**

los más grandes saltadores casi siempre es menor a 1 segundo! Un

tiempo mayor es una de muchas ilusiones que se tienen acerca de la

Si conoces la altura vertical

naturaleza.

d**, puedes reordenar esta**

Una ilusión relacionada es la altura vertical que puede saltar un

expresión para obtener:

ser humano. La mayoría de tus compañeros de clase probablemente

no puedan saltar más de 0.5 metros. Pueden pasar por encima de

2 d

$t =$

una valla de 0.5 metros, pero, al hacerlo, su cuerpo sólo se eleva un g

poco. La altura de la barrera es diferente de la altura a la que se eleva No se tienen noticias de

el “centro de gravedad” del saltador. Muchas personas pueden saltar

algún jugador de baloncesto

por encima de una valla de 1 metro, pero sólo rara vez alguien eleva

que haya logrado un salto

el “centro de gravedad” de su cuerpo 1 metro. Ni siquiera las más

vertical estacionario de 1.25

grandes estrellas del baloncesto pueden elevar su cuerpo 1.25 metros

metros.6 Si se establece que

de altura, aunque con facilidad *pueden* llegar bastante más arriba de *d* es igual a 1.25 metros y se

la canasta, que está a más de 3 metros de altura.

usa el valor más preciso de 9.8 m/s2 para *g*, se resuelve *t,* la mitad del La habilidad para saltar se mide mejor con un salto vertical

tiempo “de vuelo”, y se obtiene:

estacionario. Párate frente a una pared con los pies bien asentados en el suelo y los brazos extendidos hacia arriba. Haz una marca sobre la 2 *d*

2(.

1 25m)

pared en la parte superior de tu extensión. Luego realiza tu salto y, en *t* =

=

= .

0 50 s

2

el pico, haz otra marca. La distancia entre estas dos marcas mide tu

g

.

9 8m/s

salto vertical. Si es de más de 0.6 metros (2 pies), ¡eres excepcional!

Duplica este valor (porque éste es el tiempo para un sentido de un

He aquí la física. Cuando saltas hacia arriba, la fuerza del salto

viaje redondo arriba y abajo) y obtendrás el tiempo en el aire para

se aplica solamente mientras tus pies tienen contacto con el suelo.

romper el récord de 1 segundo.

Cuanto mayor sea la fuerza, mayor será tu rapidez de lanzamiento

Aquí se estudia el movimiento vertical. ¿Y qué hay de los

y más alto será el salto. En cuanto tus pies abandonan el suelo, tu

saltos al correr? En el Capítulo 10 aprenderás que el tiempo en

rapidez ascendente disminuye de inmediato a la tasa estable de *g*, el aire sólo depende de la rapidez vertical de lanzamiento del

10 m/s2. En la parte más alta de tu salto, tu rapidez ascendente

saltador. Mientras está en el aire, la rapidez horizontal del saltador disminuye a cero. Entonces comienzas a caer y ganas rapidez

permanece constante y sólo la rapidez vertical experimenta

exactamente a la misma tasa, *g*. Si aterrizas como despegaste, recto aceleración. ¡Física interesante!

con las piernas extendidas, entonces el tiempo de ascenso es igual al tiempo de caída. El tiempo en el aire es la suma de los tiempos de

ascenso y de caída. Mientras estás en el aire, ningún tipo de bombeo

6Para un salto al correr, la rapidez de despegue puede aumentar y el

de piernas o brazos u otros movimientos corporales pueden cambiar

tiempo en el aire se extiende conforme los pies saltan del suelo. Esto se tu tiempo en el aire.

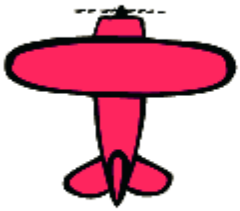
estudiará en el Capítulo 10.

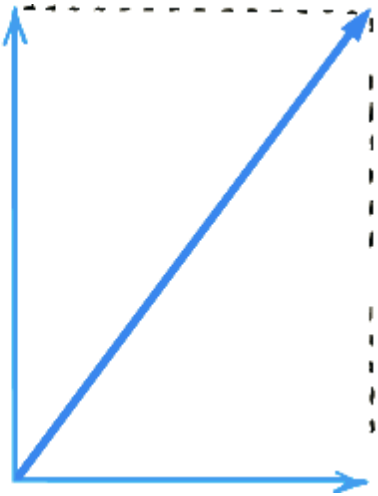
Qué tan rápido cambia el "qué tan rápido"

Gran parte de la confusión que surge cuando se analiza el movimiento de los objetos que caen se debe a que es fácil mezclar el "qué tan rápido" con el "cuánto recorre". Cuando se quiere especificar qué tan rápido cae algo, se habla de la *rapidez* o la *velocidad,* que se expresa como $v = gt$. Cuando se quiere especificar cuánto recorre algo que cae, se habla de la *distancia,* que se expresa como $d = \frac{1}{2} gt^2$. Es importante entender que la rapidez o la velocidad (qué tan rápido) y la distancia (cuánto recorre) son completamente diferentes entre sí.

Un concepto más confuso, y probablemente el más difícil que se encuentra en este libro, es el "qué tan rápido cambia el qué tan rápido" —aceleración—. Lo que hace que la aceleración sea tan compleja es que se trata de una *tasa de cambio*. Con frecuencia se confunde con la velocidad, que en sí misma es una tasa (la tasa de cambio de posición).

La aceleración no es velocidad, ni siquiera es un cambio de velocidad. Es importante entender que la aceleración es la tasa a la que cambia la velocidad misma.





C A PÍ T U LO 3 M OV I M I EN TO L I N E A L

51

3.6 Vectores de velocidad

Mientras que la rapidez es una medida de "qué tan rápido", la velocidad es una medida de "qué tan rápido" y "en cuál dirección". Si la lectura en el velocímetro de un automóvil es de 100 kilómetros por hora (km/h), tú conoces la rapidez. Si también hay una brújula en el tablero e indica que el automóvil se mueve hacia el norte, por ejemplo, SCREENCAST: Vectores de velocidad conoces su velocidad: 100 km/h hacia el norte. Conocer tu velocidad es conocer tu rapidez y tu dirección. La rapidez es una cantidad escalar y la velocidad es una cantidad vectorial.

Piensa en un avión que vuela hacia el norte a 80 km/h en relación con el aire circundante. Supón que el avión queda atrapado en un viento cruzado de 60 km/h (viento que sopla en ángulo recto con la dirección del avión) que lo desvía de su curso original. Este ejemplo se representa con vectores en la Figura 3.12, donde los vectores de velocidad se señalan en una escala tal que 1 centímetro (cm) representa 20 km/h. Por tanto, la velocidad de 80 km/h del avión se muestra con el vector de 4 cm, y el viento cruzado de 60 km/h se muestra con el vector de 3 cm. La diagonal del paralelogramo construido (en este caso, un rectángulo) mide 5 cm, que representa 100 km/h. De modo que el avión se mueve a 100 km/h en relación con el suelo en una dirección inclinada 37

hacia el este del norte.

80 km/h

100 km/h

Resultante

(Escala: 1 cm = 20 km/h)

60 km/h

El par de vectores de 6 y 8 unidades

en ángulo recto dice: "podemos

F I G U R A 3 . 1 2

ser un seis y un ocho, pero juntos

El viento cruzado de 60 km/h desvía de curso, a 100 km/h, al

avión que viaja a 80 km/h.

somos un 10 perfecto".

P U N T O D E C O N T R O L

Piensa en un bote de motor que normalmente viaja a 10 km/h en aguas tranquilas. Si el bote se dirige directamente a través del río, que fluye a una tasa de 10 km/h, ¿cuál será su velocidad en relación con la orilla?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Cuando el bote se dirige a través de la corriente (en ángulo recto respecto del flujo del río), su velocidad es de 14.1 km/h, 45 corriente abajo. Recuerda del Capítulo 2

que el paralelogramo formado por un par de vectores con igual longitud en ángulo recto mutuo es un cuadrado que tiene una diagonal 12 tim

v e

e s t

ce he l

s l en

a l g

o th o

ngi f e

tuach s

d d ide (

e case

d e

a

lado (Figura 2.9).

Por favor, recuerda que a las personas les tomó casi 2,000 años,

desde la época de Aristóteles, para llegar a una clara comprensión del movimiento, ¡así que sé paciente contigo mismo si descubres que necesitas algunas horas para lograr esto!

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)

Rapidez. Qué tan rápido se mueve un objeto; la distancia

Cantidad escalar. Cantidad que sólo tiene una magnitud, no

recorrida por unidad de tiempo.

una dirección.

Rapidez instantánea. La rapidez en algún instante.

Aceleración. Tasa a la que cambia la velocidad con el tiempo;

Rapidez promedio. Distancia total recorrida dividida entre el el cambio de velocidad puede ser en magnitud, dirección o

tiempo de viaje.

ambos.

Velocidad. Rapidez y dirección de movimiento de un objeto.

Caída libre. Movimiento sólo bajo la influencia de la gravedad.

Cantidad vectorial. Cantidad que tiene tanto magnitud como

dirección.

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N)

3.1 El movimiento es relativo

12. Por lo general, la aceleración se define como la tasa de

1. Mientras lees esto en tu silla, ¿qué tan rápido te mueves

cambio en el tiempo de la velocidad. ¿Cuándo se puede

en relación con la silla? ¿En relación con el Sol?

definir como la tasa de cambio en el tiempo de la rapidez?

13. ¿Qué descubrió Galileo sobre la rapidez que gana

3.2 Rapidez

una bola cada segundo cuando rueda hacia abajo

2. ¿Cuáles son las dos unidades de medición necesarias para

por un plano inclinado? ¿Qué dice esto acerca de la

describir la rapidez?

aceleración de la bola?

3. ¿Qué tipo de rapidez registra el velocímetro de un

14. ¿Qué relación descubrió Galileo entre la aceleración de

automóvil: rapidez promedio o rapidez instantánea?

una bola y la inclinación de un plano? ¿Qué aceleración

4. ¿Cuál es la rapidez promedio, en kilómetros por hora,

ocurre cuando el plano es vertical?

de un caballo que galopa una distancia de 15 km en un

tiempo de 30 min?

3.5 Caída libre

5. ¿Cuánto recorre un caballo que galopa a una rapidez

15. ¿Qué se entiende exactamente por objeto en “caída libre”?

promedio de 25 km/h durante 30 min?

16. ¿Cuál es la ganancia en rapidez por segundo para un

objeto en caída libre?

3.3 Velocidad

17. ¿Cuál es la velocidad adquirida por un objeto en caída

6. ¿Cuál es la principal diferencia entre rapidez y velocidad?

libre 5 s después de soltarse desde una posición de reposo?

7. Si un automóvil se mueve con una velocidad constante,

¿Cuál es la velocidad 6 s después?

¿también se mueve con una rapidez constante?

18. La aceleración de caída libre es aproximadamente 10 m/s2.

8. Si un automóvil se mueve a 90 km/h y da vuelta a una

¿Por qué la unidad de segundos aparece dos veces?

esquina, también a 90 km/h, ¿mantiene una rapidez

19. Cuando un objeto se lanza hacia arriba, ¿cuánta rapidez

constante? ¿Una velocidad constante? Defiende tus

pierde cada segundo (si ignoras la resistencia del aire)?

respuestas.

20. ¿Qué relación entre distancia recorrida y tiempo

3.4 Aceleración

descubrió Galileo para los objetos en caída libre que se

sueltan desde el reposo?

9. ¿Cuál es la aceleración de un automóvil que se mueve en

un camino recto y aumenta su rapidez de 0 a 100 km/h

21. ¿Cuál es la distancia que recorre un objeto en caída libre

en 10 s?

1 s después de soltarse desde una posición de reposo?

¿Cuál es la distancia para una caída de 4 s?

10. ¿Cuál es la aceleración de un automóvil que mantiene

una velocidad constante de 100 km/h durante 10 s? (¿Por

22. ¿Cuál es el efecto de la resistencia del aire sobre la

qué algunos de tus compañeros de clase que respondieron

aceleración de los objetos que caen?

correctamente la pregunta anterior responden mal esta

23. Considera estas mediciones: 10 m, 10 m/s y 10 m/s2.

pregunta?)

¿Cuál es una medida de rapidez, cuál de distancia y cuál de

11. ¿Cuándo estás más consciente de tu movimiento en

aceleración?

un vehículo en movimiento: cuando se mueve de

3.6 Vectores de velocidad

manera estable en una línea recta o cuando acelera? Si

estuvieras en un automóvil que se mueve con velocidad

24. ¿Cuál es la rapidez en tierra de un avión que vuela a

absolutamente constante (sin tumbos en absoluto),

100 km/h en relación con el aire, al que pescó un viento

¿estarías al tanto del movimiento?

cruzado en ángulo recto de 100 km/h?

C A PÍ

PÍ T U LO 3 R

E V ISI Ó N

53

P I E N S A Y R E A L I Z A (A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 25. La abuela está interesada en tu avance educativo. Envía

27. Puedes comparar tu tiempo de reacción con el de un

a tu abuela un mensaje de texto y, sin usar ecuaciones,

amigo al atrapar una regla que se suelta

explícale la diferencia entre velocidad y aceleración.

entre tus dedos. Haz que tu amigo

26. Intenta esto con tus amigos. Sostén un billete de modo

sostenga la regla como se muestra y tú

que su punto medio cuelgue entre

cierra los dedos en cuanto veas la regla

los dedos de tu amigo y rétalo

caer. El número de centímetros que pasan

a atrapar el billete juntando sus

por tus dedos depende de tu tiempo de

dedos cuando sueltes el billete.

reacción. Puedes expresar el resultado en

¡No podrá atraparlo! Explicación:

fracciones de segundo si reordenas

de acuerdo con $d = ½\ gt^2$, el

$d = ½\ gt^2$. Al expresarla para tiempo se

billete caerá una distancia de

obtiene $t = 12\ d/g = 0.0451\ d$, donde d 8 centímetros (la mitad de la lon-está en centímetros.

gitud del billete) en un tiempo

28. Párate con los pies bien asentados en el

de 1/8 de segundo, pero el tiempo

piso frente a una pared. Traza una marca en el punto

requerido para que los impulsos

más alto que puedas alcanzar. Luego salta verticalmente

necesarios viajen de su ojo a su

y marca este punto más alto. La distancia entre las dos

cerebro y de ahí a los dedos es de

marcas es tu distancia de salto vertical. Usa estos datos

al menos 1/7 de segundo.

para calcular tu tiempo "de vuelo" (en el aire) personal.

S U S T I T U Y E Y L I S T O (F A M I L I A R I Z A C I Ó N C O N E C U A C I O N E S) ***Estas son actividades del tipo "sustituye los números" para fami-31. Demuestra que la aceleración de un automóvil que puede***

liarizarte con las ecuaciones del capítulo. Principalmente son sus-ir desde el reposo hasta 100 km/h en 10 s es 10 km/h · s.

tituciones de un paso y son menos difíciles que los Piensa y resuelve.

32. Demuestra que la aceleración de un hámster es 5 m/s2

distancia

cuando aumenta su velocidad desde el reposo a 10 m/s

Rapidez = tiempo

en 2 s.

29. Demuestra que la rapidez promedio de un conejo que

Distancia 5 rapidez promedio 3 tiempo

corre una distancia de 30 m en un tiempo de 2 s es 15 m/s.

33. Demuestra que el hámster del problema anterior recorre

30. Calcula tu rapidez promedio al caminar cuando das un

una distancia de 22.5 m en 3 s.

paso de 1 m en 0.5 s.

34. Demuestra que una roca en caída libre cae una distancia

distancia total recorrida

de 45 m cuando se suelta desde el reposo durante 3 s.

Rapidez promedio =

intervvalo de tiempo

P I E N S A Y R E S U E L V E (A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 35. Tú lanzas una bola recto hacia arriba con una rapidez

38. Un automóvil tarda 10 s en ir desde v = 0 m/s hasta

inicial de 30 m/s. ¿Qué tan alto sube y cuánto tiempo

v = 25 m/s a aceleración constante. Si quieres encontrar la

permanece en el aire (ignora la resistencia del aire)?

distancia recorrida con la ecuación d = 1/2 at 2, ¿qué valor 36. Una bola se lanza con suficiente rapidez, recto hacia

debes usar para a?

arriba, de modo que está en el aire durante varios

39. Sorprendentemente, muy pocos deportistas pueden saltar

segundos. (a) ¿Cuál es la velocidad de la bola cuando

más de 2 pies (0.6 m) recto hacia arriba. Usa d = 1/2 gt 2

alcanza su punto más alto? (b) ¿Cuál es su velocidad 1 s

para conocer el tiempo que uno destina a moverse hacia

antes de alcanzar su punto más alto? (c) ¿Cuál es el cambio

arriba en un salto vertical de 0.6 m. Luego duplícalo para

de velocidad durante este intervalo de 1 s? (d) ¿Cuál es su

conocer el "tiempo de vuelo", el tiempo que los pies están

velocidad 1 s después de alcanzar su punto más alto? (e)

despegados del suelo.

¿Cuál es el cambio de velocidad durante este intervalo de

40. Un dardo sale del cañón de una pistola de aire con una

1 s? (f) ¿Cuál es el cambio de velocidad durante el

rapidez v. La longitud del cañón de la pistola de aire es L.

intervalo de 2 s? (¡Cuidado!) (g) ¿Cuál es la aceleración de

Supón que la aceleración del dardo en el cañón es uniforme.

la bola durante cualquiera de estos intervalos de tiempo y

a. Demuestra que el dardo se mueve dentro del cañón

en el momento cuando la bola tiene velocidad cero?

durante un tiempo de 2 L/ v.

37. ¿Cuál es la velocidad instantánea de un objeto en caída

b. Si la rapidez de salida del dardo es 15 m/s y la longitud

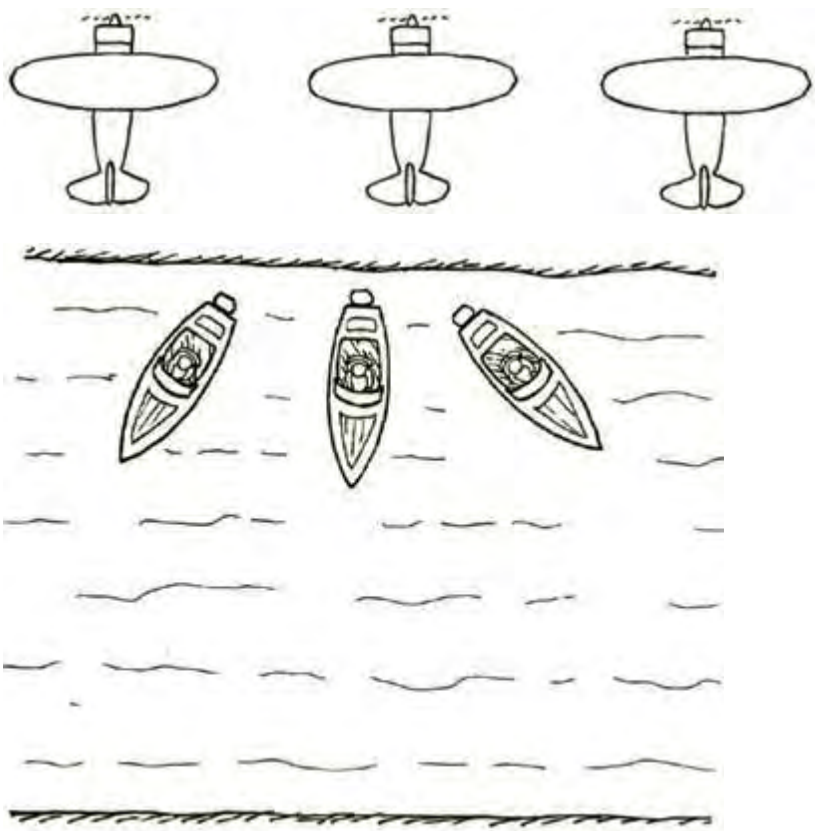
libre 10 s después de que se suelta desde una posición

del cañón de la pistola de aire es 1.4 m, demuestra que el

de reposo? ¿Cuál es su velocidad promedio durante este

tiempo que el dardo está en el cañón es de 0.19 s.

intervalo de 10 s? ¿Qué distancia caerá durante este tiempo?



PA R T E U N O

M EC Á N I C A

P I E N S A Y C L A S I F I C A (A N Á L I S I S)

41. El trotador Jake corre por una plataforma de ferrocarril

44. Tres bolas de diferentes masas se lanzan recto hacia arriba

que se mueve con las velocidades que se muestran en las

con las rapideces iniciales indicadas.

posiciones A-D. De mayor a menor, clasifica las velocidades

de Jake en relación con un observador estacionario en el

suelo. (Llama positiva la dirección hacia la derecha.)

4 m/s

6 m/s

15 m/s

10 m/s

A

B

3 m/s

A

B

C

8 m/s

10 m/s

1 kg

1.5 kg

0.8 kg

4 m/s

6 m/s

a. De la más rápida a la más lenta, clasifica las rapideces

C

D

de las bolas 1 s después de lanzarlas.

b. De mayor a menor, clasifica las aceleraciones de las

bolas 1 s después de lanzarlas. (¿O las aceleraciones

6 m/s

18 m/s

son iguales?)

42. Se hace una pista con una pieza de hierro acanalado,

45. Aquí tienes una vista superior de un avión que se desvía

como se muestra. Una bola que se suelta en el extremo

de su curso por vientos que soplan en tres direcciones

izquierdo de la pista pasa por los distintos puntos.

diferentes. Usa un lápiz y la regla del paralelogramo

Clasifica las rapideces de la bola en los puntos A, B, C

para dibujar los vectores que muestren las velocidades

y D, del más rápido al más lento. (Ten cuidado con las

resultantes en cada caso. Clasifica las rapideces del avión

clasificaciones que empaten.)

en tierra, de más rápida a más lenta.

A

B

D

C

Viento

43. Una bola se suelta en el extremo izquierdo de estas tres

Viento

pistas diferentes. Las pistas se doblan a partir de trozos de

A

B

C

Viento

igual longitud de hierro acanalado.

46. Aquí tienes una vista superior de tres botes de motor que

A

cruzan un río. Todos tienen la misma rapidez en relación

con el agua y todos experimentan la misma corriente

del río. Construye vectores resultantes que muestren la

B

rapidez y la dirección de cada bote. Clasifica los botes de

más a menos para:

a. el tiempo para llegar a la orilla opuesta.

C

b. el viaje más rápido.

a. De la más rápida a la más lenta, clasifica las rapideces

de las bolas en los extremos derechos de las pistas.

A

b. De la más larga a la más corta, clasifica las pistas en

términos de los tiempos que transcurren para que las

B

bolas lleguen a los extremos.

c. De mayor a menor, clasifica las pistas en términos de

las rapideces promedio de las bolas. ¿O todas las bolas

C

tienen la misma rapidez promedio en las tres pistas?

C A PÍ T U LO 3 R E V ISI Ó N

55

P I E N S A Y E X P L I C A (S Í N T E S I S)

47. Mo mide su tiempo de reacción en 0.18 en el ejercicio

63. Para un objeto en caída libre soltado desde el reposo, ¿cuál

27 del Piensa y realiza. Jo mide su tiempo de reacción en

es la aceleración al final del quinto segundo de caída? ¿Al

0.20 s. ¿Quién tiene el tiempo de reacción más favorable?

final del décimo segundo de caída? Defiende tus respuestas.

Explica.

64. Si la resistencia del aire se puede pasar por alto, ¿cuál es la

48. Jo, con un tiempo de reacción de 0.2 segundos, viaja en

diferencia entre la aceleración de una bola que se lanzó recta

su bicicleta con una rapidez de 6.0 m/s. Ella encuentra

hacia arriba y su aceleración cuando simplemente se suelta?

una situación de emergencia e "inmediatamente" aplica

65. Cuando un jugador de béisbol lanza una bola recto hacia

sus frenos. ¿Cuánto recorre Jo antes de realmente aplicar

arriba, ¿en cuánto se reduce la rapidez de la bola cada

los frenos?

segundo mientras asciende? En ausencia de resistencia

49. ¿Cuál es la rapidez de impacto de un automóvil que se

del aire, ¿en cuánto aumenta la rapidez cada segundo

mueve a 100 km/h y choca con la parte trasera de otro

mientras desciende? ¿Cuál es el tiempo requerido para

automóvil que viaja en la misma dirección a 98 km/h?

subir, comparado con el tiempo de caída?

50. Suzie Pieseguro puede remar una canoa en aguas

66. Boy Bob está de pie en el borde de un risco (como en

tranquilas a 8 km/h. ¿Cuánto éxito tendrá si rema

la Figura 3.8) y lanza una bola casi recta hacia arriba

corriente arriba en un río que fluye a 8 km/h?

con cierta rapidez y otra bola casi recta hacia abajo con

51. ¿Una multa por rebasar el límite de velocidad se basa en

la misma rapidez inicial. Si la resistencia del aire es

la rapidez promedio o en la rapidez instantánea? Explica.

irrelevante, ¿cuál bola tendrá mayor rapidez cuando golpee

52. Un avión viaja hacia el norte a 300 km/h mientras otro

el suelo abajo?

viaja hacia el sur a 300 km/h. ¿Sus rapideces son iguales?

67. Responde la pregunta anterior para el caso donde la

¿Sus velocidades son iguales? Explica.

resistencia del aire no sea insignificante, es decir, donde el 53. La luz viaja en línea recta con una rapidez constante de

arrastre del aire afecte al movimiento.

300,000 km/s. ¿Cuál es la aceleración de la luz?

68. Mientras hace rodar bolas hacia abajo por un plano

54. Tú viajas en un automóvil con un límite de rapidez

inclinado, Galileo observa que la bola rueda 1 codo

específico. Ves que un automóvil se aproxima hacia ti con

(la distancia del codo a la punta de los dedos) mientras

la misma rapidez. ¿Cuán rápido se aproxima el automóvil

cuenta hasta 10. ¿Cuánto habrá rodado la bola, desde su

hacia ti, comparado con el límite de rapidez?

punto de partida, cuando cuente hasta 20?

55. Tú conduces hacia el norte sobre una autopista. Luego,

69. Considera un proyectil lanzado verticalmente cuando

sin cambiar de rapidez, das vuelta en una curva y

el arrastre del aire es irrelevante. ¿Cuándo es mayor la

conduces hacia el este. (a) ¿Cambia tu velocidad? (b)

aceleración debida a la gravedad: cuando asciende, en la

¿Aceleras? Explica.

parte superior o cuando desciende? Defiende tu respuesta.

56. Jacob dice que la aceleración es qué tan rápido vas.

70. Extiende las Tablas 3.2 y 3.3 para incluir tiempos de

Emily dice que la aceleración es qué tan rápido te vuelves

caída de 6 a 10 s, y asume que no hay resistencia del aire.

rápido. Ambos buscan tu confirmación. ¿Quién está en

71. Si no hubiera la resistencia del aire, ¿por qué sería

lo correcto?

peligroso salir a la calle los días lluviosos?

57. A partir del reposo, un automóvil acelera hasta una

72. A medida que aumenta la rapidez de un objeto en caída

rapidez de 50 km/h, y otro automóvil acelera hasta

libre, ¿la aceleración también aumenta?

una rapidez de 60 km/h. ¿Puedes decir cuál automóvil

73. Una bola lanzada hacia arriba regresará al mismo punto

experimenta mayor aceleración? ¿Por qué sí o por qué no?

con la misma rapidez inicial cuando la resistencia del

58. ¿Cuál es la aceleración de un automóvil que se mueve

aire sea despreciable. Cuando la resistencia del aire no es

con una velocidad constante de 100 km/h durante 100 s?

despreciable, ¿cómo se compara su rapidez de regreso con

Explica tu respuesta.

su rapidez inicial?

59. ¿Cuál es mayor: una aceleración desde 25 km/h hasta

74. ¿Por qué el tiempo en el aire de una persona sería mucho

30 km/h, o una desde 96 km/h hasta 100 km/h, si ambas

mayor en la Luna que en la Tierra?

ocurren durante el mismo tiempo?

75. ¿Por qué un chorro de agua se estrecha a medida que cae

60. Galileo experimentó con bolas que rodaban sobre

del grifo?

planos inclinados a varios ángulos. ¿Cuál es el rango de

76. La lluvia que cae verticalmente forma manchas inclinadas

aceleraciones para ángulos desde 0 hasta 90 (desde

en las ventanas laterales de un automóvil en movimiento. Si

cuál aceleración hasta cuál otra)?

las manchas forman un ángulo de 45, ¿cuál es la diferencia

61. Supón que un objeto en caída libre de algún modo se

entre la rapidez del automóvil y la de la lluvia que cae?

equipa con un velocímetro. ¿En cuánto aumentaría su

77. Plantea una pregunta de opción múltiple que compruebe

lectura de rapidez con cada segundo de caída?

que tus compañeros de clase entendieron la diferencia

62. Supón que el objeto en caída libre del ejercicio anterior

entre rapidez y velocidad.

también está equipado con un odómetro. ¿Las lecturas

78. Plantea una pregunta de opción múltiple que compruebe

de la distancia que cae cada segundo indicarían iguales o

que tus compañeros de clase entendieron la diferencia

diferentes distancias de caída por segundos sucesivos?

entre velocidad y aceleración.

56

PA R T E U N O

M EC Á N I C A

P I E N S A Y D I S C U T E (E V A L U A C I Ó N)

79. ¿Un automóvil con una velocidad hacia el norte puede

93. Uno de tus amigos dice que si un automóvil viaja hacia

tener simultáneamente una aceleración hacia el sur?

el este, no puede al mismo tiempo acelerar hacia el oeste.

Convence a tus compañeros de clase de tu respuesta.

¿Cuál es tu respuesta?

80. ¿Un objeto puede invertir su dirección de viaje

94. Madison lanza una bola recto hacia arriba. Anthony

mientras mantiene una aceleración constante? Si es así,

suelta una bola. Tu compañero de discusión dice que

proporciona un ejemplo a tus compañeros de clase. Si no,

ambas bolas experimentan la misma aceleración. ¿Cuál

ofrece una explicación.

es tu respuesta?

81. Para el movimiento en línea recta, explica a tus

95. Dos bolas se sueltan en forma simultánea desde el reposo

compañeros de clase cómo un velocímetro indica si

en el extremo izquierdo de las pistas de igual longitud A

ocurre o no aceleración.

y B, como se muestra. ¿Cuál bola llega primero al final

82. Corrige a tu amigo que dice: "el dragster dio vuelta a la

de su pista?

esquina con una velocidad constante de 100 km/h".

83. Cita un ejemplo de algo que tenga una rapidez constante

A

que también tenga una velocidad variable. ¿Puedes citar

B

un ejemplo de algo con una velocidad constante y una

rapidez variable? Defiende tus respuestas.

84. Cita un ejemplo en el que tu rapidez pueda ser cero

96. Consulta el par de pistas del ejercicio anterior. (a) ¿En

mientras que tu aceleración sea distinta de cero.

cuál pista la rapidez promedio es mayor? (b) ¿Por qué la

85. Cita un ejemplo de algo que experimente aceleración

rapidez de la bola al final de las pistas es la misma?

mientras se mueve con rapidez constante. ¿También

97. Un bote cruza un río con una rapidez de 3 m/s. Con-

puedes proporcionar un ejemplo de algo que acelere

vence a tus compañeros de clase de que, si el río fluye a

mientras viaja con velocidad constante? Explica a tus

4 m/s, la rapidez del bote en relación con la ribera es

compañeros de clase.

de 5 m/s.

86. (a) ¿Un objeto puede moverse cuando su aceleración es

98. Si gotas de lluvia caen verticalmente con una rapidez de

cero? Si es así, proporciona un ejemplo. (b) ¿Un objeto

3 m/s y tú corres horizontalmente a 4 m/s, convence a

puede acelerar cuando su rapidez es cero? Si es así, da un

tus compañeros de clase de que las gotas golpearán tu

ejemplo.

rostro con una rapidez de 5 m/s.

87. ¿Puedes citar un ejemplo en el que la aceleración de un

99. Un avión con una rapidez en el aire de 120 km/h

cuerpo tenga una dirección opuesta a su velocidad? Si es

encuentra un viento cruzado de 90 km/h. Convence a

así, ¿qué ejemplo puedes citar a tus compañeros de clase?

tus compañeros de clase de que la rapidez en tierra del

88. ¿En cuál de estas colinas la bola rueda hacia abajo con

avión es de 150 km/h.

rapidez creciente y aceleración decreciente a lo largo de la

100. En este capítulo estudiaste casos idealizados de bolas que

trayectoria? (Usa este ejemplo si quieres explicar a alguien

ruedan sobre planos lisos y objetos que caen sin resistencia

la diferencia entre rapidez y aceleración.)

del aire. Supón que un compañero de clase se queja de que

toda esta atención centrada en casos idealizados no vale la pena porque los casos idealizados simplemente no ocurren en el mundo cotidiano. ¿Cómo responderías a esta queja? ¿Cómo supones respondería el autor de este libro?

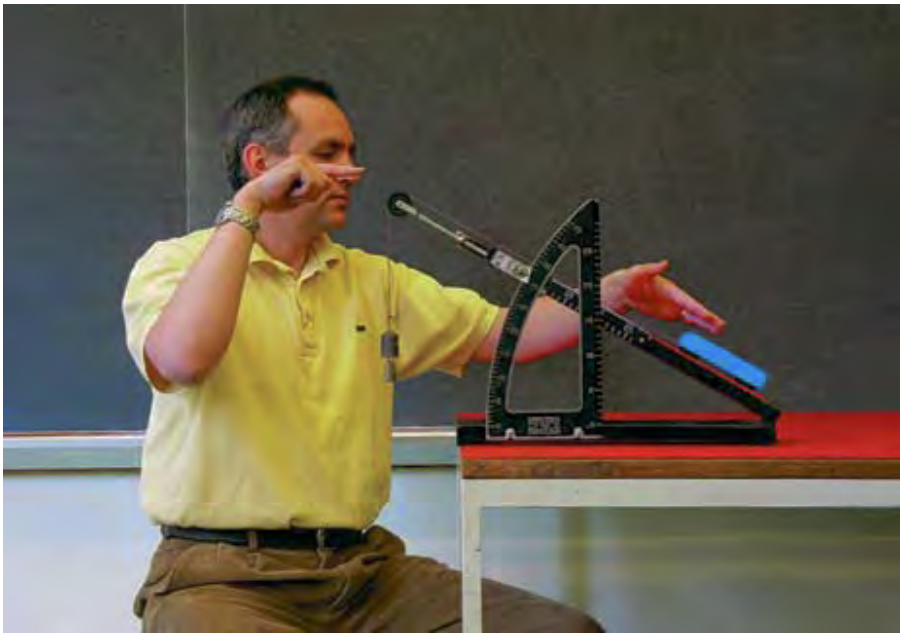
89. Supón que las tres bolas que se muestran en el ejercicio 88 parten simultáneamente desde lo alto de las colinas. ¿Cuál llega primero al fondo? Explica.

90. Sé quisquilloso y corrige a tu amigo que dice: "en caída libre, la resistencia del aire es más efectiva para frenar una pluma que una moneda".

91. Si sueltas un objeto, su aceleración hacia el suelo es de 10 m/s2. Si lo lanzas hacia abajo, ¿su aceleración después de lanzarlo será mayor que 10 m/s2? ¿Por qué sí o por qué no?

Recuerda: las Preguntas conceptuales te permiten comprobar si comprendiste las ideas centrales del capítulo. Las de Sustituye y listo y las de Piensa y resuelve se centran en la naturaleza matemática del material del capítulo. Puedes emplear tu pensamiento crítico con las de Piensa y clasifica. Los ejercicios Piensa y explica y Piensa y discute son "el remate" para redondear la cobertura del material del capítulo.

92. En el ejercicio anterior, ¿puedes pensar en una razón por la que la aceleración del objeto lanzado hacia abajo a través del aire pueda ser notablemente menor que 10 m/s2? Discute tu razonamiento con tus compañeros de clase.



4 1

C A P Í T U L O 4

Segunda ley

de Newton de 2

movimiento

4.1

La fuerza causa aceleración

4.2

Fricción

4.3

Masa y peso

3

4.4

Segunda ley de Newton de movimiento

4.5

Cuando la aceleración es g: caída libre

4.6

Cuando la aceleración es menor que g: caída

no libre

4

1 Jill Johnsen pregunta a sus alumnos por qué la bola más pesada, cuando se suelta, no cae más rápido que la bola más ligera.

2 Efraín López muestra que, cuando las fuerzas sobre el bloque azul se equilibran en cero, no ocurre aceleración. 3 Los paracaidistas con trajes aéreos (wingsuits) hacen lo que las ardillas voladoras siempre han hecho, pero más rápido. 4 Cuando Emily Abrams

patea el balón, éste experimenta una aceleración.

de edad cuando incluyó sus

tres leyes de movimiento en

Galileo introdujo el concepto de aceleración, es decir,

la tasa a la que cambia la velocidad con el tiem-

po: a Δ *v/* Δ *t. Pero, ¿qué produce la aceleración?*

lo que generalmente se reco-

Esa pregunta la responde la segunda ley de Newton. Es la

noce como el libro científico

fuerza. La segunda ley de Newton vincula los conceptos

más importante jamás escrito,

fundamentales de aceleración y fuerza con el concepto de

Philosophiae Naturalis Princi-

masa de Galileo, dado por la famosa ecuación a 5 F/m. Es pia Mathematica.

interesante que Isaac Newton se haya vuelto famoso no por

Cuando Newton cumplió

sus leyes de movimiento y ni siquiera por su ley de la gra-

46 años, sus energías se aleja-

vitación universal. Su fama comenzó con su estudio de la

ron un poco de la ciencia y fue

luz, pues observó que la luz blanca estaba compuesta de los

elegido como miembro del

colores del arcoíris.

Parlamento por un periodo de

Isaac Newton nació prematuramente el día de Navidad

un año. A los 57 fue elegido Isaac Newton

(1642-1727)

de 1642 y apenas sobrevivió en la hacienda de su madre en

para un segundo periodo. En

Inglaterra. Su padre murió varios meses antes de su naci-

los dos años que estuvo en el

miento y él creció bajo el cuidado de su madre y su abuela.

Parlamento nunca pronunció discurso alguno. Un día se

En su niñez no mostró signos particulares de bril antez; puso de pie y la Cámara guardó silencio para escuchar al cuando era adolescente, lo sacaron de la escuela para que

gran hombre. El "discurso" de Newton fue muy breve: sim-

ayudara a su madre a administrar su hacienda. Tenía poco

plemente pidió que cerraran una ventana porque había una

interés en las labores de cultivo y prefería leer los libros que

corriente de aire. También fue miembro de la Royal Society,
pedía prestados a un vecino. Un tío suyo, quien percibió el
donde, a los 60 años de edad, fue elegido presidente y des-
potencial académico del joven Isaac, hizo arreglos para que
pués fue reelecto año tras año durante el resto de su vida.
regresara a la escuela durante un año y luego se graduara
Aunque a los 30 años de edad Newton ya tenía el cabe-
de la Universidad de Cambridge, sin distinción particular.
l o gris, permaneció abundante, largo y ondulado toda su
Cuando una plaga azotó Inglaterra, Newton se retiró a
vida y, a diferencia de otros en su época, no usó peluca. Era
la hacienda de su madre, esta vez para continuar sus estu-
un hombre modesto, enormemente sensible a las críticas
dios. Ahí, a la edad de 22 y 23 años, sentó los cimientos de
y nunca se casó. Continuó sano en cuerpo y mente hasta
la obra que habría de inmortalizarlo. La leyenda dice que
edad longeva. A los 80 años de edad todavía tenía todos sus
ver caer una manzana al suelo lo condujo a pensar en la
dientes, su vista y audición eran agudas y su mente era lúci-
fuerza de la gravedad que se extiende hasta la Luna y más
da. En su vida fue considerado por sus compatriotas como
al á. Formuló y aplicó la ley de la gravitación universal para
el científico más grandioso que hubiera vivido jamás. Fue
resolver los misterios centenarios del movimiento planeta-

nombrado cabal ero por la reina Anna en 1705.

rio y las mareas oceánicas, que estudiarás en el Capítulo 9.

Newton murió a los 84 años de edad y fue enterrado en

A los 26 años de edad, Newton fue nombrado profe-

la Abadía de Westminster junto con los monarcas y héroes

sor lucasiano de matemáticas en el Trinity Col ege en de Inglaterra. Sus leyes del movimiento proporcionaron los Cambridge. Tuvo conflictos personales con las posturas cimientos para el Programa Apol o, que 282 años después religiosas del instituto, a saber, cuestionar la idea de la tri-colocó a los seres humanos en la Luna. Su primera ley fue

nidad como un dogma fundamental del cristianismo en la ley de la inercia, que estudiaste en el Capítulo 2. En este aquel a época. No fue sino hasta que Newton tuvo 42 años

capítulo estudiarás su segunda ley de movimiento.

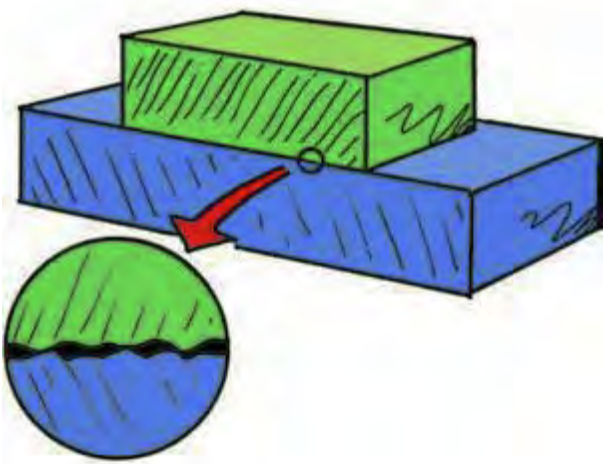
4.1 La fuerza causa aceleración

Piensa en un disco de hockey en reposo sobre el hielo. Golpea el disco (aplica una fuerza), y éste acelera. Cuando el bastón de hockey ya no lo empuja (esto es, cuando sobre el disco ya no actúan fuerzas desequilibradas) el disco se mueve con velocidad constante. Si aplicas otra fuerza al golpear nuevamente el disco, de nuevo cambia el movimiento. Las fuerzas desequilibradas que actúan sobre un objeto hacen que el objeto acelere.

Con mucha frecuencia, la fuerza aplicada no es la única fuerza que actúa sobre un objeto. También pueden actuar otras fuerzas. Recuerda del Capítulo 2 que la combina-F I G U R A 4 . 1

ción de las fuerzas que actúan sobre un objeto es la fuerza neta. La aceleración depende Patea la bola y ella acelera.

de la fuerza neta. Para aumentar la aceleración de un objeto debes aumentar la fuerza



neta que actúa sobre él. Si duplicas la fuerza neta sobre un objeto, su aceleración se La fuerza

duplica; si triplicas la fuerza neta, su aceleración se triplica; y así sucesivamente. Esto de la mano

tiene sentido. Se dice que la aceleración de un objeto es directamente proporcional a la acelera el ladrillo

fuerza neta que actúa sobre él y se escribe:

Aceleración ~ fuerza neta

El símbolo ~ significa "es directamente proporcional a". Ello significa, por ejemplo, El doble de fuerza

que si uno se duplica, el otro también se duplica.

produce el doble

de aceleración

P U N T O D E C O N T R O L

1. Empuja una caja que esté sobre un piso liso y acelera. Si aplicas cuatro veces la fuerza neta, ¿cuánto mayor será la aceleración?

El doble de fuerza sobre el

***2. Si empujas con la misma fuerza aumentada sobre la misma caja encima** doble de masa produce la*

***de un piso muy rugoso, ¿la aceleración será mayor o menor que si la** misma aceleración*

empujaras sobre un piso liso? (¡Piensa antes de leer la respuesta abajo!)

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

F I G U R A 4 . 2

La aceleración es directamente propor-

***1.** La caja tendrá cuatro veces más aceleración.*

cional a la fuerza.

2. *La caja tendrá menos aceleración porque la fricción reducirá la fuerza neta.*

4.2 *Fricción*

VIDEO: La fuerza causa una

aceleración

Cuando las superficies se deslizan o tienden a deslizarse una sobre otra, actúa una fuerza de ***fricción****. Cuando aplicas una fuerza a un objeto, la fricción por lo general reduce la fuerza neta y la aceleración resultante. La fricción es causada por las irregularidades de las superficies que están en contacto mutuo y depende de los tipos de material y de cuánto se presionan entre sí. Incluso las superficies que parecen ser muy lisas tienen irregularidades microscópicas que obstruyen el movimiento. Los átomos se adhieren en muchos puntos de contacto. Cuando un objeto se desliza contra otro, el primero debe elevarse sobre las salientes irregulares o de otro modo desprender átomos. De cualquier forma se necesita una fuerza.*

La dirección de la fuerza de fricción siempre es en la dirección contraria al movimiento. Un objeto que se desliza hacia abajo por un plano inclinado experimenta una fricción dirigida hacia arriba del plano; un objeto que se desliza hacia la derecha experimenta fricción hacia la izquierda. Por ende, si un objeto debe moverse con velocidad ***F I G U R A 4 . 3***

constante, debe aplicarse una fuerza igual a la fuerza de fricción opuesta para que las La fricción es consecuencia de las dos fuerzas se cancelen exactamente una a la otra. La fuerza neta igual a cero entonces irregularidades en las superficies y resulta en una aceleración igual a cero y una velocidad constante.

de atracciones mutuas (pegajosidad)

entre los átomos de las superficies

Sobre una caja que se asienta en reposo encima de un piso a nivel no existe fricción. de los objetos que se deslizan. Incluso Pero si empujas la caja en sentido horizontal perturbarás las superficies de contacto y se las superficies que parecen ser lisas producirá fricción. ¿Cuánta? Si la caja todavía está en reposo, entonces la fricción que tienen superficies irregulares cuando se opone al movimiento es suficiente para cancelar tu empuje. Si empujas horizontal- se ven a nivel microscópico.

mente con, por decir, 70 newtons, la fricción se acumula para volverse 70 newtons. Si empujas más duro (por decir, 100 newtons) y la caja está a

punto de deslizarse, la fricción entre la caja y el suelo se opone a tu empuje con 100 newtons. Si 100 newtons es lo más que puede reunir la superficie, entonces, cuando empujas un poco más duro, la adherencia cede y la caja se desliza.1

1Aun cuando pueda no parecerlo todavía, la mayor parte de los conceptos en física realmente no son complicados.

Pero la fricción es diferente: es un fenómeno muy complicado. Los hallazgos son empíricos (obtenidos a partir de una amplia serie de experimentos) y las predicciones son aproximadas (también con base en la experimentación).

Fricción

Fuerza de gravedad

F I G U R A 4 . 4

La dirección de la fuerza de fricción siempre se opone a la dirección del movimiento. (Izquierda) Empuja la caja hacia la derecha y la fricción actúa hacia la izquierda. (Derecha) La fuerza de gravedad sobre el costal actúa hacia abajo y la fricción del aire (resistencia del aire) actúa hacia arriba. (¿Cuál es la aceleración del costal cuando la resistencia del aire se incrementa hasta coincidir con la fuerza de la gravedad?) Es interesante saber que la fricción de deslizamiento es un poco menor que la fricción que se acumula antes de que el deslizamiento tenga lugar. Los físicos e ingenieros distinguen entre fricción estática y resistencia al deslizamiento (conocida, también, como fricción cinética). Para superficies dadas, la fricción estática es un poco mayor Las llantas tienen canales, no para

que la resistencia al deslizamiento. Si empujas una caja, necesitas más fuerza para aumentar la fricción, sino para

ponerla en marcha que para mantenerla en deslizamiento. Antes de la época de los desplazar y redirigir el agua de

sistemas de frenos antibloqueo, las frenadas en seco de un automóvil eran bastante entre la superficie del camino y el

problemáticas. Cuando las llantas se bloquean, éstas se deslizan, lo que proporciona lado de abajo de la llanta. Muchos

automóviles de carreras usan

menos fricción que si rodaran hasta detenerse. Una llanta que rueda no se desliza a lo llantas sin estrías porque corren en

largo de la superficie del camino, y la fricción es fricción estática, con más agarre que días secos.

la fricción cinética. Pero una vez que las llantas comienzan a deslizarse, la fuerza de fricción se reduce, lo que no es algo bueno. Un sistema de frenado antibloqueo mantiene las llantas por debajo del umbral de pérdida de frenado para comenzar a deslizarse.

También es interesante que la fuerza de fricción no dependa de la rapidez. Un automóvil que patina a baja rapidez tiene aproximadamente la misma fricción que el mismo automóvil que derrapa con una gran rapidez. Si la

fuerza de fricción sobre una llanta es de 100

newtons a baja rapidez, con una buena aproximación es de 100 newtons a una rapidez mayor. La fuerza de fricción puede ser mayor cuando la llanta está en reposo y a punto de deslizarse, pero, una vez que se desliza, la fuerza de fricción permanece aproximadamente igual.

Más interesante aún: la fricción no depende del área de contacto. En una llanta más estrecha, el mismo peso se concentra en un área menor sin que cambie la cantidad de fricción. De modo que las llantas extra anchas que ves en algunos automóviles no proporcionan más fricción que las llantas más angostas. Las llantas más anchas tan sólo distribuyen el peso del automóvil sobre un área mayor para reducir el calentamiento y el desgaste. De igual forma, ¡la fricción entre un camión y el suelo es la misma ya sea que el camión tenga cuatro llantas o 18! Más llantas distribuyen la carga sobre más área de terreno y reducen la presión en cada llanta. La distancia de frenado cuando se aplican los ***F I G U R A 4 . 5***

frenos no cambia con el número de llantas. Pero el desgaste que experimentan las llantas La fricción entre la llanta y el terreno

depende mucho del número de éstas.

es casi la misma ya sea que la llanta

sea ancha o angosta. El propósito de

La fricción no se limita a sólidos que se deslizan o tienden a deslizarse uno sobre otro.

la mayor área de contacto es reducir el

Ésta también ocurre en líquidos y gases, los cuales se llaman fluidos (porque fluyen). La calentamiento y el desgaste.

fricción de los fluidos ocurre cuando un objeto hace a un lado el fluido por el que se mueve. ¿Alguna vez has intentado correr 100 m con el agua a la altura de la cintura? La fricción de los fluidos es considerable, incluso a bajas rapideces. De modo que, a diferencia de la fricción entre superficies sólidas, la fricción de los fluidos depende de la rapidez. Una forma muy común de fricción de fluidos para algo que se mueve a través del aire es la resistencia del aire, también llamada arrastre aerodinámico. Por lo general, no percibes la resistencia del aire cuando caminas o trotas, pero sí la percibes a rapideces más grandes cuando viajas en bicicleta o te deslizas en esquíes colina abajo. La resistencia del aire aumenta con la rapidez.

VIDEO: Fricción

El costal en caída que se muestra en la Figura 4.4 alcanzará una velocidad constante cuando la resistencia del aire equilibre la fuerza debida a la gravedad sobre el costal.

C A PÍ T U LO 4 SEGU N DA L E Y D E N E W TO N D E M OV I M I EN TO

61

P U N T O D E C O N T R O L

¿Qué fuerza neta experimenta una caja en deslizamiento cuando ejerces una fuerza de 110 N y la fricción entre la caja y el suelo es de 100 N?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

10 N en la dirección de tu empuje (110 N – 100 N).

4.3 *Masa y peso*

La aceleración que se imparte a un objeto depende no sólo de las fuerzas aplicadas y las fuerzas de fricción, sino de la inercia del objeto, su resistencia a los cambios de movimiento.

SCREENCAST: Masa/peso

La cantidad de inercia que posee un objeto depende de la cantidad de materia que contenga: mientras más materia, más inercia. Para hablar de la cantidad de materia que tiene algo, se utiliza el término masa. Mientras mayor sea la masa de un objeto, mayor es su inercia.

La comprensión actual de la masa ahonda en su fuente, el recientemente descubierto bosón de Higgs. (Intrigante, sin duda, y se abordará en el Capítulo 32.) Por el momento, primero querrás comprender la masa en su sentido más simple: como una medida de la inercia de un objeto material. Cuanto mayor sea la masa de un objeto, mayor será su inercia.

La masa corresponde a la noción intuitiva de peso. Informalmente, se dice que algo Peso

tiene mucha materia si pesa mucho. Pero existe una diferencia entre masa y peso. Cada uno se puede definir del modo siguiente:

Masa: cantidad de materia en un objeto. También es la medida de la inercia o pereza

que un objeto muestra en respuesta a cualquier esfuerzo hecho para ponerlo en movi-

miento, frenarlo o cambiar su estado de movimiento en cualquier forma.

Peso: por lo general, la fuerza sobre un objeto debida a la gravedad.

Fuerza

En la definición de peso se dice por lo general porque un objeto puede tener peso cuan-de sostén

do la gravedad no es un factor, como ocurre en una estación espacial en rotación. En ***F I G U R A 4 . 6***

cualquier caso, cerca de la superficie de la Tierra y en ausencia de aceleración, masa y En equilibrio sobre una báscula, el peso peso son directamente proporcionales entre ellos.2

(mg) es equilibrado por una fuerza de

El peso de un objeto de masa m debido a la gravedad es igual a mg, donde g es la sostén ascendente.

constante de proporcionalidad y tiene el valor 10 N/kg (más precisamente, 9.8 N/kg). De manera equivalente, g es la aceleración debida a la gravedad, 10 m/s2 (la unidad N/kg es equivalente a m/s2).

La proporción directa entre la masa y el peso dice que si la masa de un objeto se duplica, su peso también se duplica; si la masa se reduce a la mitad, el peso se reduce a la mitad. Debido a esto, masa y peso con frecuencia se usan en forma indistinta.

Además, en ocasiones se confunden masa y peso porque es habitual medir la cantidad de materia que tienen las cosas (masa) mediante su atracción gravitacional a la Tierra (peso). Pero la masa es más fundamental que el peso; es una cantidad fundamental que escapa por completo a la observación de la mayoría de las personas.

Cuando 1 N actúa sobre 1 kg, la

Hay momentos en los que el peso corresponde a la noción inconsciente de inercia.

aceleración 5 1 m/s2. Con unidades,

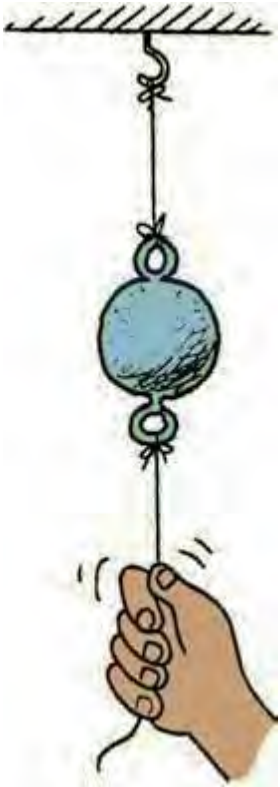
Por ejemplo, si intentas determinar cuál de dos objetos pequeños es el más pesado, a 5 F/m se lee 1 m/s2 5 1 N/1 kg. De

puedes agitarlos atrás y adelante en tus manos o moverlos en alguna forma en lugar de modo que las unidades m/s2 y N/kg

levantarlos. Al hacerlo, juzgas cuál de los dos es más difícil de poner en movimiento son equivalentes.

y sientes cuál de los dos es más resistente a un cambio de movimiento. En realidad comparas las inercias de los objetos: sus masas.

En Estados Unidos, la cantidad de materia de un objeto suele describirse por el jalón gravitacional entre él y la Tierra, o su peso, que por lo general se expresa en libras. Sin 2En el Capítulo 8 estudiarás cómo la fuerza de sostén que proporciona la rotación produce una gravedad simulada, en la que un astronauta en un hábitat espacial rotatorio experimenta peso.



embargo, en la mayor parte del mundo, la medida de la materia usualmente se expresa en una unidad de masa, el ***kilogramo****. En la superficie de la Tierra, un ladrillo con una masa de 1 kilogramo pesa 2.2 libras. En unidades métricas, la unidad de fuerza es el* ***newton****, que es igual a un poco menos que un cuarto de libra (como el peso de una hamburguesa cuarto de libra después de cocinarla). Un ladrillo de 1 kilogramo pesa aproximadamente 10 newtons (de manera más precisa, 9.8 N).3*

Lejos de la superficie de la Tierra, donde la influencia de la gravedad es menor, un ladrillo de 1 kilogramo pesa menos. También pesaría menos sobre la superficie de los planetas con gravedad más débil que la Tierra. Sobre la superficie de la Luna, ***F I G U R A 4 . 7***

por ejemplo, donde la fuerza gravitacional sobre las cosas es sólo 1/6 de la que hay El astronauta en el espacio descubre que

sobre la Tierra, un ladrillo de 1 kilogramo pesa aproximadamente 1.6 newtons (o es tan difícil agitar el yunque "que no

0.36 libras). En planetas con una gravedad mayor, pesaría más, pero la masa del pesa nada" como lo sería en la Tierra. Si

ladrillo es la misma en todas partes. El ladrillo ofrece la misma resistencia a acelerar el yunque tuviera más masa que el astro-o frenar sin importar si el objeto está sobre la Tierra, sobre la Luna o sobre cualquier nauta, ¿cuál se agitaría más: el yunque o

otro cuerpo que lo atraiga. En una nave espacial a la deriva, donde la lectura de una el astronauta?

báscula con un ladrillo en ella indicaría cero, el ladrillo seguiría teniendo masa.

Aun cuando no haga presión sobre la báscula, el ladrillo tiene la misma resistencia a cambiar de movimiento que tiene sobre la Tierra. Un astronauta tendría que ejercer la misma fuerza en la nave espacial para agitarlo atrás y adelante, que la necesaria para agitarlo atrás y adelante cuando está sobre la Tierra. Tanto en la Luna como en la Tierra tendrías que aplicar la misma cantidad de empuje para acelerar un enorme camión hasta cierta rapidez sobre una superficie a nivel. Sin embargo, la dificultad de levantarlo contra la gravedad (peso) es otra cosa. Masa y peso son diferentes entre sí (Figura 4.7).

Una buena demostración que distingue masa y peso es la bola masiva suspendida en una cuerda, como se muestra en la fotografía de entrada del Capítulo 2 y en la Figura 4.8. La cuerda superior se rompe cuando la cuerda inferior se jala con un aumento gradual de fuerza, pero la cuerda inferior se rompe cuando la cuerda inferior se tira con fuerza. ¿Cuál de estos casos destaca el peso de la bola y cuál destaca la masa de la bola?

Observa que sólo la cuerda superior sostiene el peso de la bola. De modo que, cuando la cuerda inferior se jala de manera gradual, la tensión suministrada por el tirón se transmite hacia la cuerda superior. La tensión total en la cuerda superior es causada por el jalón más el peso de la bola. La cuerda superior se rompe cuando alcanza el punto de rotura. Pero, cuando la cuerda inferior se tira con fuerza, la masa de la bola, su tendencia a permanecer en reposo, se encarga de romper la cuerda inferior.

F I G U R A 4 . 8

También es fácil confundir masa y volumen. Cuando se piensa en un objeto masi-

¿Por qué un aumento lento y continuo

vo, con frecuencia se piensa en un objeto grande. Sin embargo, el tamaño de un objeto de la fuerza descendente romperá la

*(**volumen**) no necesariamente es un buen indicador de su masa. ¿Cuál es más fácil de cuerda arriba de la bola masiva, mientras poner en movimiento: una batería de automóvil o una caja de cartón vacía del mismo que un aumento súbito romperá la*

tamaño? Así pues, se observa que la masa no es ni peso ni volumen.

cuerda inferior?

F I G U R A 4 . 9

Cuanto mayor sea la masa, mayor debe

ser la fuerza para lograr una aceleración

dada.

3De modo que, 2.2 lb es igual a 9.8 N, o 1 N es aproximadamente igual a 0.22 lb, más o menos el peso de una manzana pequeña. En el sistema métrico se acostumbra especificar las cantidades de materia en unidades de masa (en gramos o kilogramos) y rara vez en unidades de peso (en newtons). No obstante, en Estados Unidos y países que usan el sistema británico de unidades, las cantidades de materia usualmente se especifican en unidades de peso (en libras). (La unidad británica de masa, el slug, no es bien conocida.) Consulta el Apéndice A para conocer más sobre los sistemas de medición.

C A PÍ T U LO 4 SEGU N DA L E Y D E N E W TO N D E M OV I M I EN TO

63

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Un ladrillo de hierro de 2 kg tiene el doble de inercia que un ladrillo de hierro de 1 kg? ¿El doble de masa? ¿El doble de volumen?

¿El doble de peso?

2. ¿En cuál caso sería más fácil levantar un camión de cemento: sobre la superficie de la Tierra o sobre la superficie de la Luna?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Las respuestas a todas las partes es sí.*

2. *Sería más fácil levantar un camión de cemento en la Luna porque la fuerza gravitacional es menor sobre la Luna. Cuando levantas un objeto, luchas con la fuerza de gravedad (su peso). Aunque su masa es la misma en todas partes, su peso sólo es 1/6 sobre la Luna, de modo que sólo se necesita 1/6 de esfuerzo para levantarlo ahí. Sin embargo, para mover el camión horizontalmente sobre la Luna, no empujas contra la gravedad. Cuando la masa es el único factor, fuerzas iguales producirán iguales aceleraciones, ya sea que el objeto esté en la Tierra o en la Luna.*

La masa resiste la aceleración

Empuja a tu amigo sobre una patineta y tu amigo acelera. Ahora empuja igual de fuerte un elefante sobre una patineta y la aceleración es mucho menor. Verás que la cantidad de aceleración depende no sólo de la fuerza, sino también de la masa que se va a empujar. La misma fuerza aplicada al doble de masa produce la mitad de aceleración; para tres veces la masa, un tercio de aceleración. Se dice que, para una fuerza dada, la aceleración producida es inversamente proporcional a la masa; esto es, 1

F I G U R A 4 . 1 0

Aceleración □ masa

Se necesita una enorme fuerza para ace-

lerar este volquete de tres pisos de alto

Por inversamente se entiende que los dos valores cambian en direcciones opuestas. Por cuando transporta una carga habitual de ejemplo, si un valor se duplica, el otro valor se reduce a la mitad.

350 ton. Además, se necesitan frenos de

enorme fuerza para detenerlo.

4.4 *Segunda ley de Newton de movimiento*

Newton fue el primero en descubrir la relación entre tres conceptos físicos

básicos: aceleración, fuerza y masa. Propuso una de las reglas más importantes de la naturaleza: su segunda ley de movimiento. La ***segunda ley de Newton*** *afirma:* ***La aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre el objeto, está en la dirección de la fuerza neta y es inversamente proporcional a la masa del objeto.***

En forma resumida, esto es:

Cuando dos cosas son directamen-

fuerza neta

Aceleración

te proporcionales, a medida que

□

masa

una aumenta, la otra también

aumenta. Sin embargo, cuan-

Se usa la línea ondulada como un símbolo que significa "es proporcional a". Se dice do dos cosas son inversamente

que la aceleración a es directamente proporcional a la fuerza neta total F e inversamen-proporcionales, a medida que una

te proporcional a la masa m. Por esto se entiende que, si F aumenta, a aumenta por aumenta, la otra disminuye.

el mismo factor (si F se duplica, a se duplica); pero si m aumenta, a disminuye por el mismo factor (si m se duplica, a se reduce a la mitad).

Al usar unidades consistentes, como newtons (N) para fuerza, kilogramos (kg) para masa y metros por segundo al cuadrado (m/s2) para aceleración, la proporcionalidad puede expresarse como una ecuación exacta:

fuerza neta

Aceleración =

masa

La fuerza de la mano

En su forma más breve, donde a es aceleración, F es fuerza neta y m es masa, la neta

acelera el ladrillo

ecuación se convierte en

F

a = neta

m

Un objeto acelera en la dirección de la fuerza que actúa sobre él. Aplicada en la direc-La misma fuerza acelera

ción de movimiento del objeto, una fuerza aumentará la rapidez del objeto. Aplicada en 2 ladrillos en la mitad

la dirección opuesta, reducirá su rapidez. Aplicada en ángulos rectos, desviará al objeto.

Cualquiera otra dirección de aplicación resultará en una combinación de cambio en rapidez y desviación. La aceleración de un objeto siempre está en la dirección de la fuerza neta.

3 ladrillos, parte

de la aceleración

P U N T O D E C O N T R O L

1. En el Capítulo 3, la aceleración se definió como la tasa de cambio en el tiempo de la velocidad; esto es, a = (cambio en v)/tiempo. ¿En este capítulo se dice que la aceleración es la razón de fuerza a masa; esto es, a = F/m? ¿Qué es?

F I G U R A 4 . 1 1

2. Un jumbo jet cruza con velocidad constante de 1,000 km/h cuando la *La aceleración es inversamente propor-fuerza de empuje de sus motores es 100,000 N constantes. ¿Cuál es la cional a la masa.*

aceleración del jet? ¿Cuál es la fuerza de la resistencia del aire sobre el jet?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *La aceleración se define como la tasa de cambio en el tiempo de la velo-VIDEO: Segunda ley de Newton*

cidad y se produce por una fuerza. La cantidad de fuerza/masa (la causa) determina la tasa de cambio en v/tiempo (el efecto). De modo que en este capítulo se definen los términos que producen aceleración.

2. *La aceleración es cero porque la velocidad es constante. Dado que la aceleración es cero, de acuerdo con la segunda ley de Newton, la fuerza neta es cero, lo que significa que la fuerza de arrastre aerodinámico debe ser igual a la* ***SCREENCAST: Segunda ley***

fuerza de empuje de 100,000 N y actúa en la dirección opuesta. De modo que ***de Newton***

el arrastre aerodinámico sobre el jet es 100,000 N. (Observa que no es necesario conocer la velocidad del jet. Sólo es necesario saber que la velocidad es constante, el indicio de que tanto la aceleración como la fuerza neta son cero.) ***SCREENCAST: Nellie en***

un elevador

4.5 *Cuando la aceleración es g: caída libre*

Aunque Galileo introdujo los conceptos de inercia y aceleración, y fue el

primero en medir la aceleración de los objetos que caen, no podía explicar por qué los objetos de diferentes masas caían con igual aceleración. La segunda ley de Newton ofrece la 2 m

m

explicación.

Se sabe que un objeto que cae acelera hacia la Tierra debido al tirón gravitacional que la Tierra ejerce sobre él. Cuando la fuerza de gravedad es la única fuerza que actúa sobre el objeto —esto es, cuando la fricción (como la resistencia del aire) es despreciable— se dice que el objeto está en un estado de ***caída libre****.*

Cuanto mayor sea la masa de un objeto, mayor será la fuerza de atracción gravitacional entre él y la Tierra. El ladrillo doble de la Figura 4.12, por ejemplo, tiene el $F = g$

$2\ F$

2

doble de atracción gravitacional del ladrillo solo. ¿Por qué, entonces, como supuso m

$m = g$

Aristóteles, el ladrillo doble no cae el doble de rápido? La respuesta es que la acelera-F I G U R A 4 . 1 2

ción de un objeto no sólo depende de la fuerza, sino también de la resistencia del objeto El cociente de la fuerza de gravedad (F)

al movimiento, su inercia. Mientras que una fuerza produce una aceleración, la inercia sobre la masa (m) es el mismo para todos

los objetos en la misma ubicación; por

es una resistencia a la aceleración. De modo que el doble de fuerza ejercida sobre un tanto, sus aceleraciones son las mismas

objeto con el doble de inercia produce la misma aceleración que la mitad de la fuerza en ausencia de resistencia del aire.

ejercida sobre un objeto con la mitad de inercia. Pero ambos aceleran de igual modo.

El símbolo de la aceleración debida a la gravedad es g. Se usa el símbolo g, en lugar de a, para denotar que la aceleración se debe únicamente a la gravedad.

La razón entre la fuerza gravitacional y la masa para objetos en caída libre es igual a una constante: g. Esto es similar a la razón constante entre la

circunferencia y su diámetro para los círculos, que es igual a la constante p (Figura 4.13).

Ahora queda claro que la aceleración de caída libre es independiente de la masa de un objeto. Una roca 100 veces más masiva que un guijarro cae con la misma aceleración que el guijarro porque, aunque el tirón gravitacional sobre la roca es 100 veces mayor que la fuerza sobre el guijarro, la resistencia de la roca ante un cambio de movimiento (su masa) es 100 veces la del guijarro. La fuerza más grande compensa la masa igualmente más grande.

P U N T O D E C O N T R O L

En un vacío, una moneda y una pluma caen a la misma tasa, lado a lado.

¿Sería correcto decir que iguales fuerzas de gravedad actúan sobre la moneda y la pluma cuando están en un vacío?

F I G U R A 4 . 1 3

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

La razón entre la fuerza debida a la

No, no, no, ¡mil veces no! Estos objetos aceleran de igual manera no porque las fuerzas gravedad (F) y la masa (m) es la misma

de gravedad sobre ellos sean iguales, sino porque las razones entre fuerza y masa son tanto para la piedra grande como para la

pluma pequeña; de igual modo, la razón

iguales para cada uno. Aunque la resistencia del aire no esté presente en un vacío, la entre la circunferencia (C) y su diámetro

gravedad sí lo está. (Las naves espaciales que orbitan la Tierra en el vacío del espacio son (D) es la misma para círculos grandes

aceleradas por la gravedad de la Tierra, por lo que no salen disparadas en línea recta.) como para pequeños.

4.6 *Cuando la aceleración es menor que*

g : caída no libre

VIDEO: Explicación de la aceleración

de caída libre

Los objetos que caen en un vacío son una cosa, ¿pero qué ocurre con los casos prácticos de los objetos que caen en el aire? Si bien una pluma y una moneda caerán igualmente rápido en un vacío, caen de manera muy diferente en el aire. ¿Cómo se aplican las leyes de Newton a los objetos que caen en el aire? La respuesta es que las leyes de Newton se aplican a todos los objetos, ya sea que caigan libremente o caigan en presencia de fuerzas resistivas. Sin embargo, las aceleraciones son muy diferentes para los dos casos. Lo impor-Cuando Galileo intentó explicar

tante que debe tenerse en mente es la idea de fuerza neta. En un vacío, o en casos en los que por qué todos los objetos caen

con igual aceleración, ¿no le

puede despreciarse la resistencia del aire, la fuerza neta se debe solamente a la gravedad.

habría encantado conocer la regla

Sin embargo, en presencia de resistencia del aire, la fuerza neta es menor que la fuerza de a 5 F/m?

gravedad, debido a la fuerza de oposición que surge de la resistencia del aire.4

La fuerza de arrastre aerodinámico que experimenta un objeto que cae depende de dos cosas. Primero, depende del área frontal del objeto que cae; esto es: de la cantidad 4En notación matemática,

F neta $mg - R$

$a =$

$=$

m

m

SCREENCAST: Unidades

donde mg es la fuerza debida a la gravedad y R es la resistencia del aire. Observa que, cuando $R = mg$, $a = 0$; *entonces,* ***de aceleración***

sin aceleración, el objeto cae con velocidad constante. Con álgebra

elemental puedes avanzar un paso más y obtener F neta $mg - R$

R

$a =$

$=$

$= g -$

m

m

m

Vemos que la aceleración a siempre será menor que g si la resistencia del aire R impide la caída. Sólo cuando R 5 0, a 5 g.

de aire que el objeto debe hacer a un lado mientras cae. Segundo, depende de la rapidez R

del objeto que cae; cuanto mayor sea la rapidez, mayor será el número de moléculas de aire que un objeto encuentra por segundo y mayor la fuerza de impacto molecular. El arrastre aerodinámico depende del tamaño y la rapidez de un objeto que cae.

En algunos casos, el arrastre aerodinámico afecta enormemente la caída; en otros casos, no lo hace. El arrastre aerodinámico es importante para una pluma que cae.

Puesto que el área de la pluma es mucha para un objeto al que la gravedad jala tan ligeramente, no tiene que caer muy rápido antes de que la resistencia del aire que actúa hacia arriba cancele la fuerza de gravedad que actúa hacia abajo. La fuerza neta sobre la pluma es entonces cero y la aceleración termina. Cuando la aceleración termina, se dice que el objeto llegó a su ***rapidez terminal****. Si te interesa la dirección, que es hacia abajo para los objetos que caen, se dice que el objeto alcanzó su* ***velocidad terminal****.*

mg

La misma idea se aplica a todos los objetos que caen en el aire. Considera el paracai-F I G U R A 4 . 1 4

dismo. A medida que un paracaidista que cae gana rapidez, el arrastre aerodinámico Cuando la fuerza debida a la gravedad

finalmente puede incrementarse hasta que iguala la fuerza gravitacional sobre el paracai-mg es mayor que la resistencia del aire

dista. Si la fuerza neta se vuelve cero, entonces el paracaidista ya no acelera; alcanzó su R, el costal de correo que cae acelera. A

velocidad terminal. Para una pluma, la velocidad terminal es de unos cuantos centíme-rapideces mayores, R aumenta. Cuando

R 5 mg, la aceleración llega a cero, y el

tros por segundo, en tanto que para un paracaidista es de aproximadamente 200 kiló-costal alcanza su velocidad terminal.

metros por hora. Un paracaidista puede variar esta rapidez si cambia su posición. Si cae con la cabeza o con los pies primero es una forma de encontrar menos aire y por ende menos arrastre aerodinámico y así lograr máxima velocidad terminal. Para lograr una velocidad terminal menor hay que extenderse como ardilla voladora.

Las velocidades terminales son mucho menores si el paracaidista usa un traje aéreo (wingsuit), como se muestra en la fotografía al comienzo de este capítulo. El traje aéreo no sólo aumenta el área frontal del paracaidista, sino que ofrece una sustentación similar a ***VIDEO: Caída y resistencia del aire***

la que logran las ardil as voladoras cuando modelan sus cuerpos como "alas". Este nuevo y excitante deporte, el vuelo con traje aéreo, supera lo que pueden lograr las ardil as voladoras, pues un volador con traje aéreo puede alcanzar rapideces horizontales de más de 160 km/h (100 mph). Al parecer más como municiones voladoras que como ardil as vo-Resistencia

ladoras, estas "personas aves" usan sus trajes aéreos de alto rendimiento para planear con Resistencia del aire

una gran precisión. Para aterrizar de forma segura, se despliegan los paracaídas. Ha habi-del aire

do al menos un volador con traje aéreo que ha aterrizado de manera segura sin necesidad de desplegar el paracaídas.

La gran área frontal que proporciona un paracaídas produce rapideces terminales bajas que permitan aterrizajes seguros. Para entender la física de un paracaídas, considera un hombre y una mujer que saltan juntos desde la misma altitud (Figura 4.15).

Supón que el hombre pesa el doble que la mujer y que sus paracaídas, del mismo tamaño, están inicialmente abiertos. Tener paracaídas del mismo tamaño significa que, a iguales rapideces, la resistencia del aire es la misma sobre los dos. ¿Quién llega primero al suelo: el hombre pesado o la mujer más ligera? La respuesta es que la persona que cae mg

más rápido llega primero al suelo; esto es: la persona con la mayor rapidez terminal. Al principio puedes pensar que, dado que los paracaídas son iguales, las rapideces terminales para cada uno serían iguales y, por tanto, que ambos llegarían al suelo al mismo tiempo. Sin embargo, esto no ocurre porque el arrastre aerodinámico depende de la mg

rapidez. Mayor rapidez significa mayor fuerza de impacto del aire. La mujer llegará a su rapidez terminal cuando el arrastre aerodinámico contra su paracaídas sea igual ***F I G U R A 4 . 1 5***

a la fuerza de gravedad que la jala hacia abajo. Cuando esto ocurra, el arrastre aerodi-El paracaidista más pesado debe caer

námico contra el paracaídas del hombre todavía no habrá alcanzado este equilibrio.

más rápido que el paracaidista más lige-

Él debe caer más rápido que ella para que el arrastre aerodinámico iguale la mayor ro porque la resistencia del aire cancela

la mayor fuerza gravitacional que se

fuerza de gravedad sobre él.5 La velocidad terminal es mayor para la persona más pesa-ejerce sobre él.

da, con el resultado de que la persona más pesada llega al suelo primero.

5La rapidez terminal para el hombre que es el doble de pesado será aproximadamente 41% mayor que la rapidez terminal de la mujer, porque la fuerza retardadora de la resistencia del aire es proporcional a la rapidez al cuadrado.

Por tanto, el arrastre aerodinámico se vuelve más importante para las cosas que se mueven rápido, como los autos de carreras y los aviones.

P U N T O D E C O N T R O L

Nellie Netwon salta en paracaídas desde un helicóptero a gran altura. A *Con la cabeza por delante y los*

medida que cae más y más rápido por el aire, ¿su aceleración aumenta, dis-brazos pegados al cuerpo, los

paracaidistas pueden alcanzar

minuye o permanece igual?

rapideces terminales de aproxima-

damente 180 km/h (110 mph). Las

rapideces terminales son menores

con un traje aéreo y se reducen

enormemente con un paracaídas.

SCREENCAST: Problema

de paracaidista

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

La aceleración disminuye porque la fuerza neta sobre Nellie disminuye. La fuerza neta es igual a la fuerza de gravedad menos la

resistencia del aire sobre ella, y dado que la resistencia del aire aumenta con rapidez creciente, la fuerza neta, y en consecuencia la aceleración, disminuye. Por la segunda ley de Newton,

$$a = \frac{f_{neta}}{m} = \frac{mg - R}{m}$$

donde mg es la fuerza de gravedad y R es la resistencia del aire que encuentra. A medida que R aumenta, a disminuye. Observa que si Nellie cae suficientemente rápido, de modo que $R = mg$, $a = 0$, entonces, al no tener aceleración, ella cae con rapidez constante.

Piensa en un par de pelotas de tenis: una de ellas es una pelota regular hueca; la otra está llena de perdigones de hierro. Aunque tienen el mismo tamaño, la pelota llena de hierro es mucho más pesada que la pelota regular. Si las sostienes por arriba de tu cabeza y las sueltas de manera simultánea, verás que golpean el suelo aproximadamente al mismo tiempo. Pero si las sueltas desde una altura mayor (por decir, desde lo alto de un edificio) observarás que la pelota más pesada golpea el suelo primero. ¿Por qué? En el primer caso, las pelotas no ganan mucha rapidez en su corta caída. El arrastre aerodinámico que encuentran es pequeño comparado con la fuerza de gravedad sobre ellas, incluso para la pelota regular. No se aprecia la pequeña diferencia en su tiempo de llegada.

Pero cuando se sueltan desde más alto, las mayores rapideces de caída encuentran más resistencia del aire. A cualquier rapidez dada, cada pelota encuentra la misma resistencia del aire porque cada una tiene el mismo tamaño. Esta misma resistencia del aire puede ser mucha comparada con la menor fuerza gravitacional de la pelota más ligera, pero sólo poca comparada con la fuerza gravitacional de la pelota más pesada (como los paracaidistas de la Figura 4.15). Por

ejemplo, 1 N de arrastre aerodinámico que actúa sobre un objeto de 2 N reducirá su aceleración a la mitad, pero 1 N de arrastre aerodinámico sobre un objeto de 200 N sólo disminuirá un poco su aceleración. De modo que, incluso con iguales resistencias del aire, las aceleraciones de cada uno son diferentes. Aquí debes aprender una moraleja. Siempre que consideres la aceleración de algo, usa la ecuación de F I G U R A 4 .1 6

la segunda ley de Newton para guiar tu razonamiento: la aceleración es igual a la razón Estudio estroboscópico de una pelota de de la fuerza neta entre la masa. En el caso de las pelotas de tenis que caen, la fuerza neta golf (izquierda) y una pelota de espuma sobre la pelota hueca se reduce de manera considerable a medida que se incrementa el de estireno (derecha) que caen en el aire.

arrastre aerodinámico, en tanto que la fuerza neta sobre la pelota llena de hierro sólo se La resistencia del aire es despreciable para reduce un poco. La aceleración disminuye a medida que la fuerza neta se reduce, la que, la bola de golf más pesada y su aceleración es casi igual a g. La resistencia del

a su vez, disminuye a medida que aumenta el arrastre aerodinámico. Cuando el arrastre aire no es despreciable para la bola de aerodinámico se incrementa hasta igualar la fuerza gravitacional del objeto que cae, la espuma de estireno más ligera, que alcan-fuerza neta se vuelve cero y la aceleración termina.

za su velocidad terminal más pronto.

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)
Fuerza. Cualquier empuje o tirón ejercido sobre un objeto,

Newton. Unidad del SI para la fuerza. Un newton (símbolo N)

medido en newtons (o en libras, en el sistema británico).

es la fuerza que dará a un objeto de 1 kg de masa una

Fricción. Fuerza resistiva que se opone al movimiento o intento

aceleración de 1 m/s2.

de movimiento de un objeto o que pasa a otro objeto con el

Volumen. Cantidad de espacio que ocupa un objeto.

que está en contacto o a través de un fluido.

Segunda ley de Newton. La aceleración de un objeto es

Masa. Cantidad de materia en un objeto. De manera más

directamente proporcional a la fuerza neta que actúa

específica, es la medida de la inercia o pereza que un objeto

sobre el objeto, está en la dirección de la fuerza neta y es

muestra en respuesta a cualquier esfuerzo realizado para

inversamente proporcional a la masa del objeto.

ponerlo en movimiento, frenarlo, desviarlo o cambiar en

Caída libre. Movimiento sólo bajo la influencia del tirón

alguna forma su estado de movimiento.

gravitacional.

Peso. Fuerza sobre un objeto debida a la gravedad, mg. (De

Rapidez terminal. Rapidez a la que deja de acelerar un objeto

manera más general, la fuerza que un objeto ejerce sobre un

que cae porque la resistencia del aire equilibra la fuerza

medio de sostén.)

gravitacional.

Kilogramo. Unidad fundamental del SI para la masa. Un kilo-

Velocidad terminal. Rapidez terminal con una dirección

gramo (símbolo kg) es la masa de 1 litro (1 L) de agua a 4 8C.

específica.

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N) 4.1 La fuerza causa aceleración

rompimiento de la cuerda superior. ¿Esto ocurre debido

1. ¿La aceleración es proporcional a la fuerza neta, o es igual

al peso de la bola o a su masa?

a la fuerza neta?

14. En la ilustración de jalar la cuerda de la Figura 4.8,

un rápido jalón sobre la cuerda inferior resulta en el

4.2 Fricción

rompimiento de la cuerda inferior. ¿Esto ocurre debido al

2. Cuando empujas horizontalmente una caja que está en

peso de la bola o a su masa?

un piso a nivel y no se desliza, ¿cuán grande es la fuerza

15. ¿La aceleración es directamente proporcional a la masa, o de fricción sobre la caja?

es inversamente proporcional a la masa? Da un ejemplo.

3. A medida que aumentes tu empuje, ¿la fricción sobre la

caja también aumentará?

4.4 Segunda ley de Newton de movimiento

4. Una vez que la caja se desliza, ¿cuán fuerte empujas para

16. Enuncia la segunda ley de Newton de movimiento.

mantenerla en movimiento con velocidad constante?

17. Si se dice que una cantidad es directamente proporcional

5. ¿Por lo general cuál es mayor: la fricción estática o la

a otra cantidad, ¿esto significa que son iguales entre sí?

resistencia al deslizamiento sobre el mismo objeto?

Explica brevemente usando masa y peso como ejemplo.

6. ¿Cómo varía con la rapidez la fuerza de fricción para un

18. Si la fuerza neta que actúa sobre un bloque en

objeto que se desliza?

deslizamiento se triplica de alguna forma, ¿qué sucede

con la aceleración?

7. ¿La fricción de los fluidos varía con la rapidez?

19. Si la masa de un bloque en deslizamiento se triplica

4.3 Masa y peso

mientras se aplica una fuerza neta constante, ¿en cuánto

cambia la aceleración?

8. ¿Qué es más fundamental: la masa o el peso? ¿Cuál varía con la ubicación?

20. Si la masa de un bloque en deslizamiento se triplica de

alguna forma al mismo tiempo que se triplica la fuerza

9. Llena los espacios: al agitar algo hacia atrás y hacia

neta sobre él, ¿cuál es la diferencia entre la aceleración

adelante mides su

. Levántalo contra la gravedad

resultante y la aceleración original?

y mides su

.

21. ¿Cuál es la diferencia entre la dirección de la aceleración y

10. Llena los espacios: la unidad del Sistema Internacional

la dirección de la fuerza neta que la produce?

para la masa es

. La unidad del Sistema

Internacional para la fuerza es

.

4.5 Cuando la aceleración es g: caída libre

11. ¿Cuál es el peso aproximado de una hamburguesa de un

22. ¿Cuál es la condición para que un objeto experimente

cuarto de libra después de cocinarla?

una caída libre?

12. ¿Cuál es el peso de un ladrillo de un kilogramo que

23. La razón circunferencia/diámetro para todos los círculos es

descansa sobre una mesa?

. ¿Cuál es la razón fuerza/masa para cuerpos en caída libre?

13. En la ilustración de jalar la cuerda de la Figura 4.8,

24. ¿Por qué un objeto pesado no acelera más que un objeto

un jalón gradual de la cuerda inferior resulta en el

ligero cuando ambos están en caída libre?

C A PÍ T U LO 4 R E V ISI Ó N

69

4.6 Cuando la aceleración es menor que g: caída

28. ¿Cuál es la aceleración de un objeto que cae cuando

no libre

alcanza su velocidad terminal?

25. ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre un objeto de 10 N

29. ¿Por qué un paracaidista pesado cae más rápido que un

en caída libre?

paracaidista más ligero que usa un paracaídas del mismo

26. ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre un objeto de 10 N

tamaño?

que cae, cuando encuentra 4 N de resistencia del aire? ¿10

30. Si dos objetos del mismo tamaño caen por el aire con

N de resistencia del aire?

diferentes rapideces, ¿cuál encuentra mayor resistencia del

27. ¿Cuáles dos factores principales afectan la fuerza de la

aire?

resistencia del aire sobre un objeto que cae?

P I E N S A Y R E A L I Z A (A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 31. *Escribe una carta a la abuela y platícale de lo que*

el libro mientras ambos caen, de manera que ambos

aprendiste de Galileo, e introduce los conceptos de

caen igualmente a g. ¿Cuál es la diferencia entre las

aceleración e inercia. Dile que conocía las fuerzas, pero

aceleraciones si colocas el papel encima del libro elevado

que no vio su relación con la aceleración y la masa.

y luego sueltas ambos? Te puede sorprender, de modo que

Cuéntale cómo Isaac Newton sí vio la relación y cómo

inténtalo y observa. Luego explica lo que observaste.

él explica por qué los objetos pesados y ligeros en caída

34. Suelta dos bolas de diferentes masas desde la misma altura

libre adquieren la misma rapidez en el mismo tiempo.

y, a rapideces bajas, prácticamente caen juntas. ¿Rodarán

En esta carta está bien usar una ecuación o dos, en tanto

juntas por el mismo plano inclinado? Si cada una se

dejes claro a la abuela que una ecuación es una notación

suspende de una cuerda de igual longitud y forman un par

abreviada de las ideas que le explicaste.

de péndulos que se desplazan a través del mismo ángulo,

32. Suelta una hoja de papel y una moneda al mismo tiempo.

¿se balancearán de ida y vuelta al unísono? Inténtalo y

¿Cuál llega primero al suelo? ¿Por qué? Ahora arruga el

observa; luego explica usando las leyes de Newton.

papel en una pequeña bola apretada y nuevamente suéltala

35. La fuerza neta que actúa sobre un objeto y la aceleración

con la moneda. Explica la diferencia observada. ¿Caerán

resultante siempre están en la misma dirección. Puedes

juntas si se sueltan desde la ventana de un segundo piso,

demostrar esto con un carrete. Si el

tercero o cuarto? Haz la prueba y explica tus observaciones.

carrete se jala suavemente en dirección

33. Suelta un libro y una hoja de papel y verás que el libro

horizontal hacia la derecha, ¿en cuál

tiene una mayor aceleración: g. Repite, pero coloca el

dirección rodará?

papel debajo del libro de modo que sea forzado contra

S U S T I T U Y E Y L I S T O (F A M I L I A R I Z A C I Ó N C O N E C U A C I O N E S) Realiza estos cálculos simples de un solo paso y familiarízate

43. Considera que tiran un bloque de cemento de 40 kg hacia

con las ecuaciones que vinculan los conceptos de fuerza, masa y

un lado con una fuerza neta de 200 N. Demuestra que su

aceleración.

aceleración es 5 m/s2.

Peso 5 mg

v

36. Calcula el peso en newtons de una persona que tiene una

44. En el Capítulo 3 la aceleración se definió como a =

.

masa de 50 kg.

t

37. Calcula el peso en newtons de un elefante de 2,000 kg.

Demuestra que la aceleración de un carro sobre un plano

inclinado que gana 6.0 m/s cada 1.2 s es 5.0 m/s2.

38. Calcula el peso en newtons de un melón de 2.5 kg. ¿Cuál

es su peso en libras?

45. En este capítulo aprendiste que la causa de la aceleración

39. Una manzana pequeña pesa alrededor de 1 N. ¿Cuál es

F

está dada por la segunda ley de Newton: a = neta .

su masa en kilogramos? ¿Cuál es su peso en libras?

m

40. Susie Small descubre que pesa 300 N. Calcula su masa.

Demuestra que la aceleración en el problema anterior es

F

resultado de una fuerza neta de 15 N ejercida sobre un

Aceleración: a = neta

m

carro de 3 kg.

41. Calcula la aceleración de un avión de 2,000 kg con un

46. Si sabes que un objeto de 1 kg pesa 10 N, confirma que

solo motor mientras comienza a despegar con un empuje

la aceleración de una piedra de 1 kg en caída libre es

de motor de 500 N. (La unidad N/kg es equivalente

10 m/s2.

a m/s2.)

47. Un reordenamiento simple de la segunda ley de Newton

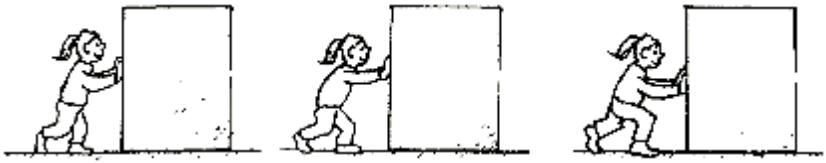
42. Calcula la aceleración de un jumbo jet de 300,000 kg

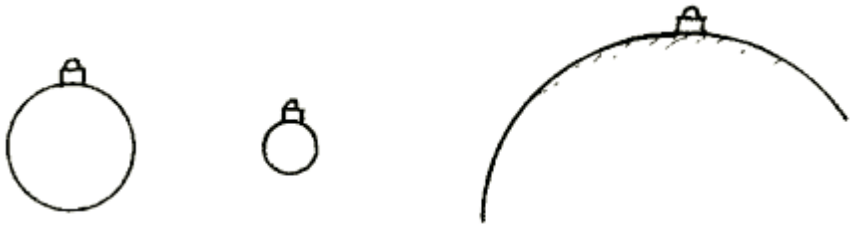
produce F neta 5 ma. Demuestra que se necesita una fuerza justo antes de despegar, cuando el empuje sobre el avión

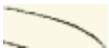
neta de 84 N ejercida sobre un paquete de 12 kg para

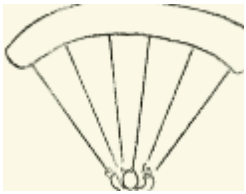
es de 120,000 N.

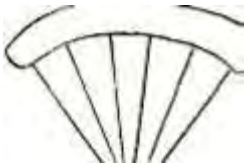
producir una aceleración de 7 m/s2.











70

PA R T E U N O

M EC Á N I C A

P I E N S A Y R E S U E L V E (A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 48. Una libra es lo mismo que 4.45 newtons. ¿Cuál es el peso

a. Demuestra que su desaceleración es 45 m/s2.

en libras de 1 newton?

b. Demuestra que la fuerza de impacto es 4,500 N. (¡Ay!)

49. Si Lillian pesa 500 N, ¿cuál es su peso en libras?

53. El autobús de una banda de rock, con masa M, acelera y

50. Considera una masa de 1 kg acelerada 1 m/s2 por una

se aleja de una señal de alto a una tasa a cuando un trozo

fuerza de 1 N. Demuestra que la aceleración sería la

de metal pesado, con masa M/5, cae encima del autobús y

misma para una fuerza de 2 N que actúa sobre 2 kg.

permanece ahí.

51. Piensa en un jet comercial de 30,000 kg de masa en

a. Demuestra que ahora la aceleración del autobús es 5/6 a.

el despegue, cuando el empuje de cada uno de sus dos

b. Si la aceleración inicial del autobús es 1.2 m/s2,

motores es 30,000 N. Demuestra que su aceleración es

demuestra que, cuando el autobús transporte consigo

2 m/s2.

el metal pesado, la aceleración será 1 m/s2.

52. Alex, quien tiene una masa de 100 kg, patina a 9 m/s

cuando choca contra una pared de ladrillos y llega a un

alto total en 0.2 s.

P I E N S A Y C L A S I F I C A (A N Á L I S I S)

54. Hay cajas de varias masas sobre una mesa nivelada sin

56. Una caja de herramientas de 100 kg está en las

fricción. De mayor a menor, clasifica cada uno de los

ubicaciones A, B y C. De mayor a menor, clasifica:

siguientes:

A

5 N

10 N

B 10 N

15 N

A

B

C

5 kg

10 kg

Júpiter

C

D

10 N

15 N

Luna

5 N

15 N

5 kg

20 kg

Tierra

a. las masas de la caja de herramientas de 100 kg.

a. Las fuerzas netas sobre las cajas.

b. los pesos de la caja de herramientas de 100 kg.

b. Las aceleraciones de las cajas.

57. Tres paracaidistas, A, B y C, alcanzaron cada uno

55. En los tres casos, A, B y C, la caja está en equilibrio (no

velocidad terminal a la misma distancia arriba del suelo.

hay aceleración). De mayor a menor, clasifícalas por la

cantidad de fricción entre la caja y el suelo.

$v = 0$

$v = 0$

$v = 1\ m/s$

100 N

120 N

130 N

A

50 kg

B

40 kg

C

75 kg

a. Del más rápido al más lento, clasifica sus velocidades

terminales.

A

B

C

b. De los más largos a los más cortos, clasifica sus

tiempos de llegada al suelo.

C A PÍ T U LO 4 R E V ISI Ó N

71

P I E N S A Y E X P L I C A (S Í N T E S I S)

58. Ejerces una fuerza sobre una bola cuando la lanzas hacia

77. El automóvil del dibujo se mueve hacia adelante mientras

arriba. ¿Cuánto dura dicha fuerza después de que la bola

se aplican los frenos. Un transeúnte dice que, durante

abandona tu mano?

el intervalo de frenado, la velocidad y la aceleración

59. En una larga bolera, una bola de boliche frena mientras

del automóvil están en direcciones opuestas. ¿Estás de

rueda. ¿Existe alguna fuerza horizontal que actúe sobre la

acuerdo o en desacuerdo?

bola? ¿Cómo lo sabes?

60. Si una motocicleta se mueve con una velocidad constante,

¿puedes concluir que no hay fuerza neta que actúe sobre

ella? ¿Y si se mueve con aceleración constante?

61. Dado que un objeto pesa menos sobre la superficie de la

Luna que sobre la superficie de la Tierra, ¿tiene menos

inercia sobre la superficie de la Luna?

62. ¿Cuál contiene más manzanas: 1 bolsa de manzanas de 1 libra

sobre la Tierra o una bolsa de manzanas de 1 libra sobre la

Luna? ¿Cuál contiene más manzanas: una bolsa de manzanas

de 1 kilogramo sobre la Tierra o una bolsa de manzanas de

78. Aristóteles afirmó que la rapidez de un objeto que cae

1 kilogramo sobre la Luna?

depende de su peso. Ahora sabes que los objetos en caída

63. Si el oro se vendiera por peso, ¿preferirías comprarlo

libre, cualesquiera sean las fuerzas gravitacionales sobre

en Denver o en Death Valley? Si se vendiera por masa,

ellos, experimentan la misma ganancia de rapidez. ¿Por

¿cuál de estas ubicaciones produciría la mejor compra?

qué las diferencias en sus fuerzas gravitacionales no

Defiende tus respuestas.

afectan sus aceleraciones?

64. En un vehículo espacial en órbita, te entregan dos cajas

79. Cuando bloquea en fútbol, un liniero defensivo con

idénticas, una llena de arena y la otra llena de plumas.

frecuencia trata de hacer que su cuerpo esté por abajo del

¿Cómo puedes determinar cuál es cuál sin abrir las cajas?

cuerpo de su oponente y empujar hacia arriba. ¿Qué efecto

tiene esto sobre la fuerza de fricción entre los pies del liniero

65. Tu mano vacía no se lastima cuando golpea ligeramente

que se oponen y el suelo?

contra una pared. ¿Por qué se lastima si llevas una carga

pesada? ¿Cuál de las leyes de Newton es más aplicable aquí?

80. Un automóvil de carreras viaja por una pista con una

velocidad constante de 200 km/h. ¿Qué fuerza neta

66. ¿La masa de un astronauta cambia cuando visita la

horizontal actúa sobre el automóvil?

Estación Espacial Internacional? Defiende tu respuesta.

81. Caída libre es el movimiento en el que la gravedad es la

67. ¿Por qué es más efectivo un cuchillo de carnicero masivo

única fuerza que actúa. (a) ¿Un paracaidista que alcanza

para cortar vegetales que un cuchillo con el mismo filo?

rapidez terminal está en caída libre? (b) ¿Un satélite arriba de

68. Cuando un automóvil chatarra se convierte en un cubo

la atmósfera, que da vueltas a la Tierra, está en caída libre?

compacto, ¿su masa cambia? ¿Su peso? Explica.

82. Cuando una moneda se lanza hacia arriba, ¿qué sucede

69. La gravedad sobre la superficie de la Luna es sólo 1/6 la grave-

con su velocidad mientras asciende? ¿Con su aceleración?

dad sobre la Tierra. ¿Cuál es el peso de un objeto de 10 kg

(Desprecia la resistencia del aire.)

sobre la Luna y sobre la Tierra? ¿Cuál es su masa en cada uno?

83. ¿Cuánta fuerza actúa sobre una moneda lanzada cuando

70. ¿Qué ocurre con el peso que indica una báscula sobre la que

está a la mitad de su altura máxima? ¿Cuánta fuerza

estás parado cuando lanzas hacia arriba un objeto pesado?

actúa sobre ella cuando llega a su pico? (Desprecia la

71. ¿Qué cambio ocurre en el peso cuando tu masa aumenta

resistencia del aire.)

en 2 kg?

84. ¿Cuál es la aceleración de una roca en la cima de su

72. ¿Cuál es tu propia masa en kilogramos? ¿Tu peso en newtons?

trayectoria cuando se lanza recto hacia arriba? (¿Tu

73. Una bolsa de comestibles puede soportar 300 N de fuerza

respuesta es congruente con la segunda ley de Newton?)

antes de romperse. ¿Cuántos kilogramos de manzanas

85. Un amigo dice que, en tanto un automóvil esté en

puede soportar con seguridad?

reposo, ninguna fuerza actúa sobre él. ¿Qué le dirías si

74. Una caja permanece en reposo sobre el suelo de una

tienes humor para corregir la afirmación de tu amigo?

fábrica mientras tú empujas sobre ella con una fuerza

86. Cuando tu automóvil avanza por la autopista con

horizontal F. ¿Cuál es la fuerza de fricción ejercida sobre

velocidad constante, la fuerza neta sobre él es cero. ¿Por

la caja por el suelo? Explica.

qué, entonces, debes mantener en operación el motor?

75. Explica cómo la primera ley de Newton de movimiento

87. ¿Cuál es la fuerza neta sobre una pequeña manzana de

puede considerarse como una consecuencia de la segunda

1 N cuando la sostienes en reposo por arriba de tu cabeza?

ley de Newton.

¿Cuál es la fuerza neta sobre ella después de soltarla?

76. Cuando un automóvil se mueve en reversa, retrocediendo

88. Una "estrella fugaz" por lo general es un grano de arena

desde la entrada para el auto, el conductor aplica

proveniente del espacio exterior que arde y produce luz

los frenos. ¿En qué dirección está la aceleración del

mientras entra en la atmósfera. ¿Qué es exactamente lo

automóvil?

que hace que arda?

72

PA R T E U N O

M EC Á N I C A

89. Una paracaidista, después de abrir su paracaídas, flota

95. ¿Bajo qué condiciones estaría en equilibrio una esfera

suavemente hacia abajo, sin ya adquirir rapidez. Ella

metálica soltada a través de un líquido viscoso?

siente el tirón ascendente del arnés, mientras la gravedad

96. Cuando Galileo soltó dos bolas del mismo tamaño,

la jala hacia abajo. ¿Cuál de estas dos fuerzas es mayor?

pero con masas diferentes, desde lo alto de la torre

¿O son iguales en magnitud?

inclinada de Pisa, la resistencia del aire realmente no

90. ¿Cuál es la diferencia entre la fuerza de gravedad sobre

era despreciable. ¿Cuál bola realmente golpeó el suelo

una gota de lluvia y el arrastre aerodinámico que

primero? ¿Por qué?

encuentra la gota cuando cae con velocidad constante?

97. Una pelota regular de tenis y otra llena de perdigones

91. Cuando un paracaidista abre su paracaídas después de

de plomo se sueltan al mismo tiempo desde lo alto de

alcanzar rapidez terminal, ¿en qué dirección acelera?

un edificio. ¿Cuál golpeará el suelo primero? ¿Cuál

92. ¿Cuál es la diferencia entre la rapidez terminal de un

experimenta mayor resistencia del aire? Defiende tus

paracaídas antes de abrirse y la rapidez terminal después

respuestas.

de abrirlo? ¿Por qué existe diferencia?

98. En ausencia de resistencia del aire, si una bola se lanza

93. ¿Cuál es la diferencia entre la fuerza gravitacional sobre

verticalmente hacia arriba con cierta rapidez inicial,

un cuerpo que cae y la resistencia del aire que encuentra

cuando regresa a su nivel original tendrá la misma rapi-

antes de alcanzar la velocidad terminal? ¿Después de

dez. Cuando la resistencia del aire es un factor, ¿la bola se

alcanzar la velocidad terminal?

moverá más rápido, igual o más lentamente que su rapi-

94. ¿Por qué un gato que accidentalmente cae de lo alto de un

dez de lanzamiento cuando regresa al mismo nivel? ¿Por

edificio de 50 pisos golpea una red de seguridad bajo él

qué? (Con frecuencia, los físicos usan un "principio de

no más rápido que si cayera del piso 20?

exageración" que les ayuda a analizar un problema. Con-

sidera el caso exagerado de una pluma, no de una bola,

porque el efecto de la resistencia del aire sobre la pluma

es más pronunciado y, por tanto, más fácil de visualizar.)

99. Si una bola se lanza verticalmente al aire en presencia de

resistencia del aire, ¿esperarías que el tiempo durante el

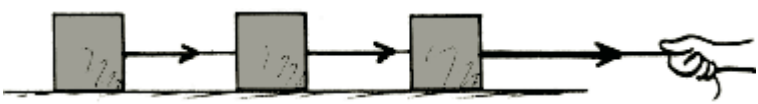
cual se eleva sea mayor o menor que el tiempo durante

el cual cae? (Usa de nuevo el principio de exageración.)

100. Formula dos preguntas de opción múltiple para com-

probar que un compañero de clase entendió la diferencia

entre masa y peso.



C A PÍ T U LO 4 R E V ISI Ó N

73

P I E N S A Y D I S C U T E (E V A L U A C I Ó N)

101. Discute si la velocidad de un objeto puede o no invertir

las tres posiciones? ¿Las aceleraciones son iguales o dife-

su dirección mientras mantiene una aceleración cons-

rentes en las tres posiciones?

tante. Si es así, proporciona un ejemplo; si no, brinda

111. Mientras saltas hacia arriba en un salto de pie, ¿cuál es la

una explicación.

diferencia entre tu peso y la fuerza que ejerces sobre el suelo?

102. Discute si es posible o no que una barra de dinamita

112. Cuando saltas verticalmente desde el suelo, ¿cuál es tu

contenga fuerza. En tu discusión haz la distinción entre

aceleración cuando alcanzas tu punto más alto? Discute

contiene y ejerce.

esto a la luz de la segunda ley de Newton.

103. ¿Es posible moverse en una trayectoria curva en ausencia

113. Discute si un objeto que cae aumenta en rapidez, o no,

de una fuerza? Discute por qué.

cuando disminuye su aceleración de caída.

104. En la Luna, un astronauta suelta una roca por encima

114. ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre una bola de 1 kg

de su cabeza. Discute qué fuerza(s) actúa(n) sobre la roca

en caída libre?

cuando cae.

115. ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre una bola de 1 kg

105. ¿Una persona que hace dieta busca perder masa o perder

que cae, si encuentra 2 N de resistencia del aire?

peso?

116. Un compañero de discusión dice que, antes de que la bola

106. Piensa en una caja pesada que descansa sobre la cama

que cae en el ejercicio anterior llegue a velocidad terminal

de la plataforma de un camión. Cuando el camión ace-

adquiere rapidez mientras su aceleración disminuye. ¿Estás lera, la caja también acelera y permanece en su lugar.

de acuerdo o en desacuerdo? Defiende tu respuesta.

Identifica y discute la fuerza que acelera la caja.

117. Explica a otros si una hoja de papel cae más lentamente,

107. Tres bloques idénticos se jalan, como se muestra, sobre

o no, que una que se estruja en una bola.

una superficie horizontal sin fricción. Si la tensión en la

118. ¿Sobre cuál la resistencia del aire será mayor: una hoja de

soga sostenida por la mano es de 30 N, ¿cuál es la ten-

papel que cae o la misma hoja apretada en una bola que

sión en las otras sogas?

cae con una rapidez terminal mayor? (¡Cuidado!)

?

?

30 N

119. Supón que sostienes una bola de ping-pong y una pelota

de golf a la altura de los brazos y las sueltas simultánea-

mente. Las verás golpear el suelo aproximadamente al

108. Para tirar de un carrito a través del pasto con velocidad

mismo tiempo. Pero, si las sueltas desde lo alto de una

constante, debes ejercer una fuerza constante. Discute y

gran escalera, verás que la pelota de golf golpea primero.

reconcilia este hecho con la primera ley de Newton, que

¿Cuál es tu explicación?

dice que el movimiento con velocidad constante no re-

120. Un oso de 400 kg que se sujeta a un árbol vertical se

quiere fuerza.

desliza con velocidad constante. ¿Cuál es la fuerza de

109. Hay un dicho que afirma: "no es la caída lo que te

fricción que actúa sobre el oso? Discute cómo la "veloci-

lastima; es la frenada súbita". Traduce esto a las leyes de

dad constante" es la clave para tu respuesta.

movimiento de Newton.

121. Cuando Nellie la paracaidista abre su paracaídas, el

110. Dibuja la trayectoria de una bola lanzada verticalmente

arrastre aerodinámico que empuja el paracaídas hacia

en el aire. (Desprecia la resistencia del aire.) Dibuja la

arriba es más fuerte que la fuerza de gravedad de la

bola a la mitad del camino de subida, en la parte superior

Tierra que la jala a ella hacia abajo. Uno de tus amigos

y a la mitad de su camino descendente hacia su punto de

dice que esto significa que ella debe comenzar a moverse

partida. Dibuja un vector de fuerza sobre la bola en las

hacia arriba. Discute con tu amigo por qué esto no es así

tres posiciones. ¿Los vectores son iguales o diferentes en

y qué es lo que sí ocurre.

C A P Í T U L O 5

Tercera ley

de Newton de 2

movimiento

5.1

Fuerzas e interacciones

5.2

Tercera ley de Newton de movimiento

5.3

Acción y reacción sobre masas diferentes

5.4

Vectores y la tercera ley

3

5.5

Resumen de las tres leyes de Newton

4

1 Darlene Librero jala con un dedo; Paul Doherty jala con

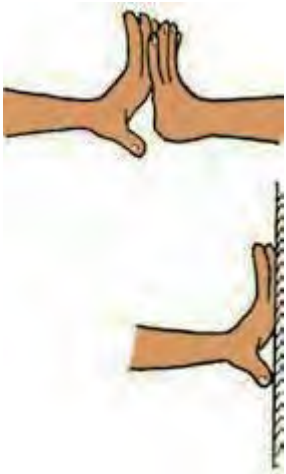
ambas manos. ¿Quién ejerce más fuerza sobre el dinamómetro?

2 La raqueta no puede golpear la bola a menos que la bola golpee de manera simultánea la raqueta, ¡es la ley! 3 Toby y Bruna

Jacobson, un matrimonio de físicos, empujan sobre un par de bás-

culas de baño. ¿Cuál lectura de báscula es mayor? 4 ¿Paul toca a su hija Gracie, o Gracie toca a su papá? La tercera ley de Newton

dice que ambos: tú no puedes tocar sin ser tocado.



C A PÍ T U LO 5 T ERCE C

R H A

A L P

E T ER

Y D 2

E N E W D

T E

O SC

N R

D I B I N

E M G

O

V M

I O

M I T

E I O

N T N

O

75

Durante casi 20 fascinantes

tema de todos los libros de

años he impartido el curso

Paul son sus aventuras en

de física conceptual los

física.

miércoles en la noche en el Explora-

Paul es un artista consu-

torium de San Francisco, curso que

mado que realiza actuacio-

se enriqueció enormemente con la

nes de física en reuniones

presencia de su fundador, Frank

profesionales, tanto en su

Oppenheimer, quien con frecuen-

país como en el extranjero.

cia se sentaba en mi clase. Cuando

Demostró la fascinación que ejerce la física ante mil ones de

Frank murió, otro gran físico tomó

personas en el Late Show with David Letterman. La fotografía

su lugar en las visitas al aula, Paul

muestra cómo, después de golpear el extremo de una barra

Doherty, a quien tuve el orgul o de recomendar para su con-

de aluminio para hacerla sonar, Paul presiona la barra entre

tratación en el Exploratorium. Paul Doherty es tan amable

los dedos para imponer un nodo y elegir una frecuencia.

y sin duda tan bril ante como Frank, y como Frank podía

Sus escaladas en roca han llevado a Paul de Yosemite,

enseñar ¡ realmente enseñar! ¡Me siento muy honrado de lugar que visita con frecuencia, al Tíbet y a montañas de más haber trabajado con estas dos personas tan especiales!

de 6,000 metros de altura en la frontera entre Chile y Argen-

Paul llegó a ser el principal científico del Exploratorium.

tina. Sus actividades a menor altitud incluyen hacer física en

Siempre que me quedaba perplejo con algún problema de la Antártida.

física, Paul estaba ahí con respuestas. Su comprensión mara-

Es fantástico para nuestra profesión que el talento de Paul

vil osamente profunda de la física explica sus muchos pre-

para enseñar se extienda hasta su Exploratorium Teacher

mios y fue acaso por el o por lo que obtuvo su doctorado del

Institute de verano, donde le gusta trabajar con profesores de

MIT en sólo cuatro años.

física. Paul describe de una hermosa manera el vínculo que

Paul Doherty es físico, profesor, autor y escalador, y desta-

ve entre científicos, profesores y estudiantes: "Los científicos

ca en todo el o. Ha escrito numerosos artículos para publica-

observan el mundo y ven cosas que nadie más ha visto. Los

ciones del Exploratorium, principalmente el Exploratorium

profesores ayudan a los alumnos a ver las cosas que nunca

Science Snackbook, valorado por los profesores de ciencias

han visto. Los alumnos plantean preguntas que ayudan a los

de todo el mundo quienes adoran tener los "secretos" de las

profesores a ver las cosas que nunca han visto". Paul Doherty

exposiciones Exploratorium revelados con tanta claridad. El

es profesor de física para todos los tiempos.

5.1 Fuerzas e interacciones

Hasta el momento se ha abordado la fuerza en su sentido más simple: como un empujón o un tirón. Sin embargo, ningún empujón o tirón ocurre solo. Toda fuerza es parte de una interacción entre una cosa y otra. Cuando empujas una pared con los dedos, sucede algo más que tu empuje sobre la pared. Tú interactúas con la pared, la que también te empuja de vuelta. Esto es evidente en tus dedos doblados, como se ilustra en la Figura 5.1. Hay un par de fuerzas involucradas: tu empuje sobre la pared y la pared que te empuja de vuelta. Estas fuerzas son iguales en magnitud (tienen la misma intensidad) y opuestas en dirección, y constituyen una sola interacción. De hecho, no puedes empujar la pared a menos que la pared te empuje a ti.1

F I G U R A 5 . 1

Puedes sentir cómo los dedos de tu amigo empujan los tuyos. También sientes la misma cantidad de fuerza cuando empujas una pared y ella te empuja de vuelta.

F I G U R A 5 . 2

De hecho, ¡no puedes empujar la pared a menos que la

Cuando te recargas contra una pared,

pared te empuje de vuelta!

ejerces una fuerza sobre la pared. La

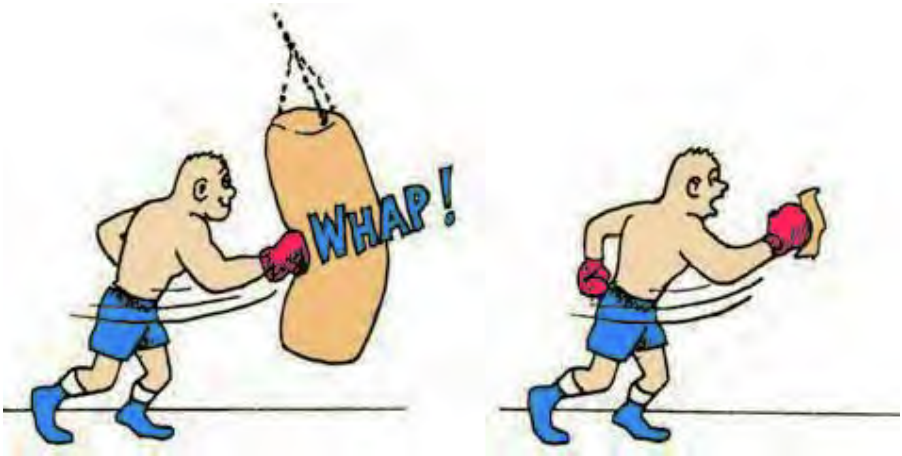
pared, simultáneamente, ejerce una

fuerza igual y opuesta sobre ti. Por

tanto, no te caes.

1Uno tiende a pensar que sólo las cosas vivas son capaces de empujar y tirar, pero las cosas inanimadas pueden hacer lo mismo. Así que, por favor, no te preocupes con la idea de la pared inanimada que empuja sobre ti.

Lo hace, tal como lo haría otra persona que se recargue contra ti.



Piensa en el puño de un boxeador que golpea un gran saco de boxeo. El puño golpea el saco (y lo abolla) al tiempo que el saco golpea de vuelta el puño (y detiene su movimiento). Al golpear el saco intervienen un par de fuerzas. El par de fuerzas puede

PIFF

ser muy grande. Pero, ¿si se golpea un papel de seda, como se muestra en la Figura 5.3? El puño del boxeador sólo puede ejercer la misma cantidad de fuerza sobre el papel de seda que la que el papel de seda ejerce sobre el puño. Es más: el puño no puede ejercer ninguna fuerza en absoluto a menos que lo que va a golpear ejerza la misma cantidad de fuerza en reciprocidad. Una in-

F I G U R A 5 . 3

teracción requiere que un par de fuerzas actúen sobre dos objetos El boxeador puede golpear el gran saco con mucha fuerza. Pero

independientes.

con el mismo golpe sólo puede ejercer una fuerza muy pequeña

Otros ejemplos: tiras de una soga unida a un carrito y ocurre

sobre el papel de seda a mitad del aire.

aceleración. Cuando jalas, el carrito te jala de vuelta, como se

demuestra, tal vez por la tensión de la soga enredada en tu mano.

Un martillo golpea una estaca y la clava en el suelo. La estaca ejerce una cantidad igual de fuerza sobre el martillo, lo que lleva al martillo a una detención abrupta. Una cosa interactúa con otra: tú con el carrito, y el martillo con la estaca.

¿Cuál ejerce la fuerza y cuál recibe la fuerza? La respuesta de Isaac Newton fue que ninguna fuerza debe identificarse como "ejecutora" o "receptora"; concluyó que ambos objetos deben tratarse por igual. Por ejemplo, cuando tiras del carrito, el carrito tira de ti. Este par de fuerzas, tu tirón sobre el carrito y el tirón del carrito sobre ti, constituyen la única interacción entre tú y el carrito. De igual modo, el par de fuerzas ejercidas sobre el martillo y la estaca constituyen una sola interacción. Tales observaciones condujeron a Newton a su tercera ley de movimiento.

F I G U R A 5 . 4

En la interacción entre el martillo y la

estaca, cada uno ejerce la misma canti-

dad de fuerza sobre el otro.

5.2 Tercera ley de Newton de movimiento

La tercera ley de Newton dice:

Siempre que un objeto ejerce una fuerza sobre un segundo objeto, el segundo objeto ejerce una fuerza igual y opuesta sobre el primero.

A una fuerza se le puede llamar fuerza de acción y a la otra fuerza de reacción. Entonces, la tercera ley de Newton se puede expresar de esta forma:

Por cada acción existe siempre una reacción igual y opuesta.

F I G U R A 5 . 5

Las fuerzas de impacto entre la bola

No importa a cuál fuerza se le llame acción y a cuál se le llame reacción. Lo importante azul y la bola amarilla mueven la bola

es que son copartícipes de una sola interacción y que una fuerza no existe sin la otra.

amarilla y detienen la bola azul.

Cuando caminas, interactúas con el suelo. Tus pies empujan

contra el suelo y el suelo empuja contra tus pies. Las dos fuerzas

ocurren al mismo tiempo (son simultáneas). Del mismo modo,

las llantas de un automóvil empujan contra el camino al tiempo

que el camino empuja de vuelta sobre las llantas: las llantas y el

camino se empujan simultáneamente uno contra las otras. Cuando nadas, interactúas con el agua; empujas el agua hacia atrás al

tiempo que el agua simultáneamente te empuja hacia adelante:

tú y el agua se empujan una contra el otro. Las fuerzas de reacción son lo que explica el movimiento en estos ejemplos. Dichas

fuerzas dependen de la fricción; es probable que una persona o un

F I G U R A 5 . 6

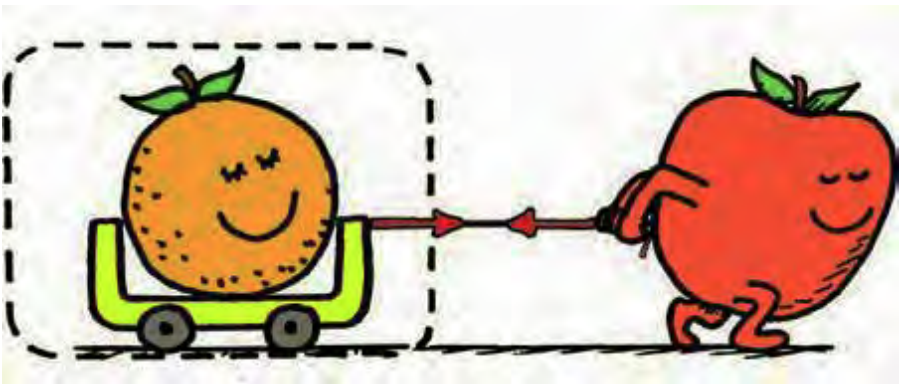
automóvil sobre el hielo, por ejemplo, no puedan ejercer la fuerza

En la interacción entre el automóvil y el camión, ¿la fuerza de

de acción para producir la fuerza de reacción necesaria. Las fuer-

impacto es la misma sobre cada uno? ¿El daño es el mismo?

zas ocurren en pares de fuerza. Ninguna fuerza existe sin la otra.



C A PÍ T U LO 5 T ERCER A L E Y D E N E W TO N D E M OV I M I EN TO

77

F I G U R A 5 . 7

Fuerzas de acción y reacción. Observa

que, cuando la acción es “A ejerce fuerza

Acción: las llantas empujan sobre el camino

Reacción: el camino empuja sobre las llantas sobre B”, la reacción es simplemente “B

ejerce fuerza sobre A”.

Acción: el cohete empuja sobre el gas

Reacción: el gas empuja sobre el cohete

Acción: el hombre tira sobre el resorte

Reacción: el resorte tira sobre el hombre

Acción: la Tierra tira sobre la bola

VIDEO: Fuerzas e interacción

Reacción: la bola tira sobre la Tierra

P U N T O D E C O N T R O L

¿Un misil que acelera posee fuerza?

SCREENCAST: Leyes de Newton de

movimiento

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

No: una fuerza no es algo que un objeto tenga, como la masa, sino que es parte de una interacción entre un objeto y otro. Un misil que acelera posee la capacidad de ejercer una fuerza sobre otro objeto cuando ocurre una interacción, pero no posee fuerza como una cosa en sí. Como verás en los siguientes capítulos, un misil que acelera posee cantidad de movimiento y energía cinética.

Define tu sistema

Con frecuencia surge una pregunta interesante: dado que las fuerzas de acción y reacción son iguales y opuestas, ¿por qué no se cancelan a cero? Para responder esta pregunta, debes tener en cuenta el sistema involucrado. Considera el sistema que consiste en una sola naranja en la Figura 5.8. La línea punteada que rodea la naranja encierra y define el sistema. El vector que sale de la línea punteada representa una fuerza externa sobre el sistema. El sistema acelera en concordancia con la segunda ley de Newton.

En la Figura 5.9, se observa que esta fuerza la proporciona una manzana, lo que no cambia el análisis. La manzana está afuera del sistema. El hecho de que la naranja simultáneamente ejerza una fuerza sobre la manzana, que es externa al sistema, puede F I G U R A 5 . 8

afectar a la manzana (otro sistema), mas no a la naranja. No puedes cancelar una fuer- Una fuerza actúa sobre la naranja, y la za sobre la naranja con una fuerza sobre la manzana. Así que, en este caso, las fuerzas naranja acelera hacia la derecha.

de acción y reacción no se cancelan.

F I G U R A 5 . 9

La fuerza sobre la naranja,

proporcionada por la manzana,

no se cancela con la fuerza de

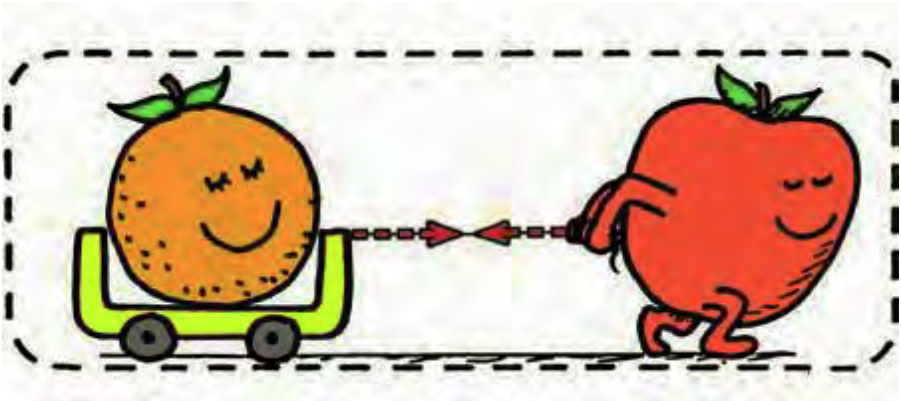
Un sistema puede ser tan pequeño

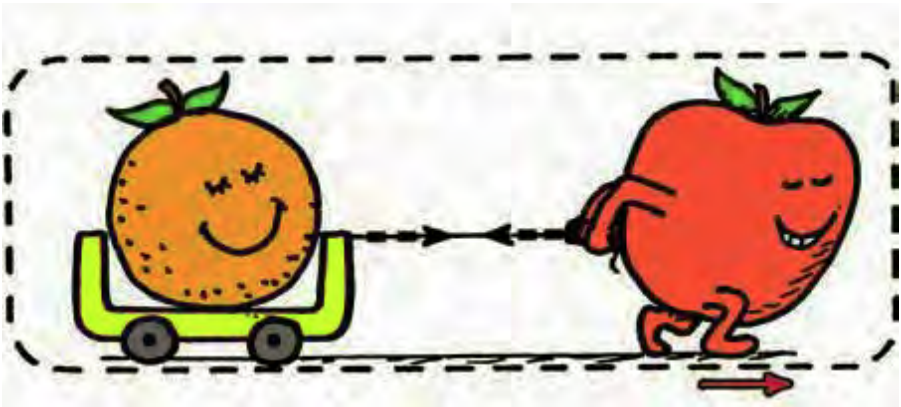
reacción sobre la manzana. Aun

como un átomo o tan grande como

así, la naranja acelera.

el Universo.





Ahora piensa en un sistema más grande, que encierra tanto a

la naranja como a la manzana. Observa el sistema acotado por la línea punteada en la Figura 5.10. Observa que el par de fuerzas es

interno al sistema naranja-manzana. Entonces, dichas fuerzas sí se cancelan mutuamente. No tienen ninguna función en la aceleración del sistema. Se necesita una fuerza externa al sistema para la aceleración. Es ahí donde la fricción con el suelo desempeña una

función (Figura 5.11). Cuando la manzana empuja contra el suelo,

F I G U R A 5 . 1 0

En el sistema más grande de naranja 1 manzana, las fuerzas el suelo simultáneamente empuja sobre la manzana, una fuerza ex- de acción y reacción son internas y se cancelan. Si éstas son terna sobre el sistema. El sistema acelera hacia la derecha. las únicas fuerzas horizontales, sin fuerza externa no ocurre En el interior de un balón de fútbol hay billones y billones de aceleración del sistema.

fuerzas interatómicas en juego. Mantienen unido el balón, pero no tienen ninguna función en la aceleración del balón. Aunque cada una de las fuerzas interatómicas es parte de un par acción-reacción dentro del balón, su combinación es cero, sin importar cuántas de ellas existan. Para acelerarlo, es necesaria una fuerza externa al balón, como una patada. En la Figura 5.12 se observa una sola interac-

ción entre el pie y el balón de fútbol.

Sin embargo, el balón de la Figura 5.13 no acelera. En este caso ocurren dos interacciones: dos fuerzas actúan sobre el balón. Si son simultáneas, iguales y opuestas, entonces la fuerza neta es cero. ¿Las dos patadas opuestas conforman un par acción-reac-

F I G U R A 5 . 1 1

ción? No, porque actúan sobre el mismo objeto, no sobre obje- Una fuerza horizontal externa ocurre cuando el piso empuja tos diferentes. Pueden ser iguales y opuestas, pero, a menos que sobre la manzana (reacción al empuje de la manzana sobre el suelo). El sistema naranja-manzana acelera.

actúen sobre diferentes objetos, no son un par acción-reacción.

¿Comprendes?

Si esto te parece confuso, es bueno saber que el mismo Newton tuvo dificultades con la tercera ley.

B

A

A

B

C

F I G U R A 5 . 1 3

F I G U R A 5 . 1 2

Tanto A como C actúan sobre B. Pueden cance-

A actúa sobre B, y B acelera.

larse mutuamente. Si lo hacen, B no acelera.

P U N T O D E C O N T R O L

1. En un día frío y lluvioso, te encuentras en el automóvil con una batería descargada. Debes empujar el automóvil para moverlo y echarlo a andar.

¿Por qué no puedes mover el automóvil si permaneces cómodamente

sentado en su interior y empujas contra el tablero?

2. ¿Por qué un libro que reposa sobre una mesa nunca acelera "espontáneamente" en respuesta a los billones de fuerzas interatómicas que actúan dentro de él?

3. Se sabe que la Tierra tira sobre la Luna. Entonces, ¿la Luna también tira sobre la Tierra?

4. ¿Puedes identificar las fuerzas de acción y reacción en el caso de un objeto que cae en el vacío?

C A PÍ T U LO 5 T ERCER A L E Y D E N E W TO N D E M OV I M I EN TO

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. En este caso, el sistema que se debe acelerar es el automóvil. Si permaneces en el interior y empujas sobre el tablero, el par de fuerzas que produces actúa y VIDEO: Acción y reacción sobre

reacciona dentro del sistema. Dichas fuerzas se cancelan en lo que respecta a diferentes masas

cualquier movimiento del automóvil. Para acelerar el automóvil, debe haber una interacción entre el automóvil y algo externo, por ejemplo, tú en el exterior empujando contra el camino y sobre el automóvil.

2. Cada una de estas fuerzas interatómicas es parte de un par acción-reacción en el interior del libro. Dichas fuerzas suman cero, sin importar cuántas fuerzas existan.

Eso es lo que hace que la primera ley de Newton se aplique al libro. El libro tiene aceleración cero a menos que una fuerza externa actúe sobre él.

3. Sí, ambos jalones constituyen un par de fuerzas acción-reacción asociadas a la VIDEO: Acción y reacción sobre

un rifle y una bala

interacción gravitacional entre la Tierra y la Luna. Es posible decir que (a) la Tierra tira sobre la Luna y (b) la Luna, del mismo modo, tira sobre la Tierra, pero es más ilustrador pensar que esto es una sola interacción: tanto la Tierra como la Luna tiran simultáneamente una sobre la otra, cada una con la misma cantidad de fuerza. No puedes empujar o tirar sobre algo a menos que algo empuje o tire simultáneamente sobre ti. ¡Ésa es la ley!

4. Para identificar un par de fuerzas acción-reacción en cualquier situación, identifica primero el par de objetos en interacción involucrados: el cuerpo A y el cuerpo B. El cuerpo A, el objeto que cae, interactúa (gravitacionalmente) con el cuerpo B, toda la Tierra. De modo que la Tierra tira hacia abajo sobre el objeto (llámala acción), en tanto el objeto tira hacia arriba sobre la Tierra (reacción).

A

B

5.3 Acción y reacción sobre masas diferentes

(a)

Por extraño que pueda parecer al principio, un objeto que cae tira hacia arriba sobre la Tierra con tanta fuerza como la Tierra tira hacia

A

B

abajo sobre el objeto. La aceleración resultante del objeto que cae es evidente, en tanto que la aceleración ascendente de la Tierra es muy

(b)

pequeña para detectarse. Así que, hablando estrictamente, cuando bajas de una acera, la calle

A

B

se eleva muy ligeramente para encontrarte.

F I G U R A 5 . 1 4

Puedes ver que la Tierra acelera ligeramente La roca tira hacia arriba a la Tierra con (c)

en respuesta a un objeto que cae si consideras tanta fuerza como la Tierra tira hacia los ejemplos exagerados de dos cuerpos plane-abajo a la roca.

A

tarios, los incisos del (a) al (e) de la Figura 5.15.

B

Las fuerzas entre los cuerpos A y B son iguales en magnitud y con dirección opuesta en cada caso. Si la aceleración del planeta A no es apreciable en (a), entonces es más (d)

apreciable en (b), donde la diferencia entre las masas es menos extrema. En (c), donde ambos cuerpos tienen igual masa, la aceleración del objeto A es tan evidente como lo es para B. A continuación, se observa que la aceleración de A se vuelve aún más evidente A

B

en (d) e incluso más en (e).

La función de diferentes masas es evidente en un cañón que dispara. Cuando un cañón se dispara, hay una interacción entre el cañón y la bala de cañón (Figura 5.16).

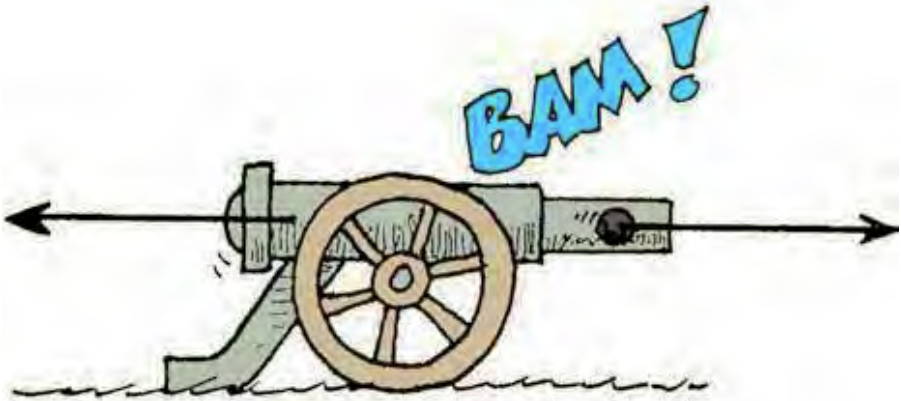
(e)

Un par de fuerzas actúa sobre el cañón y la bala de cañón. La fuerza ejercida sobre la bala de cañón es tan grande como la fuerza de reacción ejercida sobre el cañón; en F I G U R A 5 .1 5

¿Cuál cae hacia el otro: A o B? Aunque

consecuencia, el cañón recula. Dado que las fuerzas son iguales en magnitud, ¿por qué las fuerzas entre cada par son las mis-el cañón no recula con la misma rapidez que la bala de cañón?

mas, ¿las aceleraciones difieren?


БАМ!

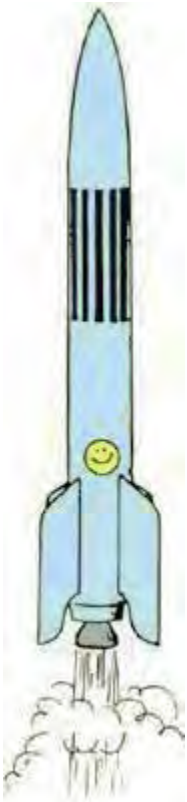


FIGURA 5.16

La fuerza ejercida contra el

cañón que recula es tan grande

como la fuerza que impulsa la

SCREENCAST: Tercera ley de Newton

bala de cañón dentro del barril.

¿Por qué, entonces, la bala de

cañón acelera más que el cañón?

SCREENCAST: Problema de la ley

Cuando analizas cambios de movimiento, la segunda ley de Newton te recuerda de Newton

que también debes considerar las masas involucradas. Supón que F representa tanto la fuerza de acción como la de reacción, m la masa de la bala de cañón y m la masa del cañón mucho más masivo. Entonces, para encontrar las aceleraciones de la bala de cañón y del cañón se comparan las razones de fuerza a masa:

F

Bala de cañón:

$= a$

m

F

Cañón:

$= a$

m

Esto muestra por qué el cambio de velocidad de la bala de cañón es tan grande comparado con el cambio de velocidad del cañón. Una fuerza dada ejercida sobre una masa pequeña produce una gran aceleración, en tanto que la misma fuerza ejercida sobre una masa grande produce una aceleración pequeña.

En el ejemplo del objeto que cae, si usas símbolos igualmente exagerados para re-F I G U R A 5 . 1 7

presentar la aceleración de la Tierra que reacciona ante un objeto que cae, el símbolo m El globo recula del aire que escapa y se

para la masa de la Tierra sería de tamaño astronómico. La fuerza F debida a la grave-mueve hacia arriba.

dad del objeto que cae dividida entre esta gran masa resultaría en una a microscópica que representaría la aceleración de la Tierra hacia el objeto que cae.

Puedes extender la idea de un cañón que recula de la bala que dispara para comprender la propulsión de cohetes. Piensa en un globo inflado que retrocede cuando expulsa aire (Figura 5.17). Si el aire se expulsa hacia abajo, el globo acelera hacia arriba.

El mismo principio se aplica a un cohete, que "recula" continuamente del gas de escape expulsado. Cada molécula de gas de escape es como una pequeña bala de cañón disparada desde el cohete (Figura 5.18).

Una idea equivocada que suele tenerse es que un cohete es impulsado por el impacto de los gases de escape contra la atmósfera. De hecho, antes de la llegada de los cohetes, por lo general se pensaba que enviar un cohete a la Luna era imposible. ¿Por qué?

Porque no hay aire sobre la atmósfera de la Tierra sobre el cual empujar el cohete. Pero esto es como decir que un cañón no recularía a menos que la bala de cañón tuviera aire sobre el cual empujar. ¡No es cierto! Tanto el cohete como el cañón que recula aceleran debido a las fuerzas de reacción ejercidas por el material que disparan, no debido a algún empuje sobre el aire. De hecho, un cohete opera mejor fuera de la atmósfera, donde no hay resistencia del aire.

Con la tercera ley de Newton puedes entender cómo un helicóptero consigue su ***F I G U R A 5 . 1 8***

fuerza de sustentación. Las aspas que giran tienen la forma adecuada para forzar hacia El cohete recula de las “balas de cañón

abajo (acción) las partículas de aire, y el aire fuerza las aspas hacia arriba (reacción).

moleculares” que dispara y se mueve

Esta fuerza de reacción ascendente se llama sustentación. Cuando la sustentación es hacia arriba.

igual a la fuerza debida a la gravedad sobre la aeronave, el helicóptero flota en el aire.

Cuando la sustentación es mayor, el helicóptero asciende.

Esto es válido para aves y aviones. Para volar, las aves empujan el aire hacia abajo.

A su vez, el aire empuja el ave hacia arriba. Cuando el ave asciende, las alas deben Las medusas han usado durante

adquirir una forma tal que desvíen hacia abajo las partículas de aire que mueven. Las eones la propulsión de cohete o jet.

alas ligeramente inclinadas que desvían hacia abajo el aire entrante producen sustentación en un avión. El aire que se empuja hacia abajo de manera continua mantiene

la sustentación. Este suministro de aire se obtiene con el movimiento hacia adelante de la aeronave, que resulta de las hélices o motores que empujan el aire hacia atrás. El aire, a su vez, empuja las hélices o motores hacia adelante. En el Capítulo 14 aprenderás que la superficie curva de un ala es una superficie sustentadora, que aumenta la fuerza de sustentación.

Puedes ver la tercera ley de Newton en acción en todas partes. Un pez empuja el agua hacia atrás con sus aletas y el agua empuja al pez hacia adelante. Cuando el viento empuja contra las ramas de un árbol y las ramas empujan de vuelta sobre el viento, se producen silbidos. Las fuerzas son interacciones entre diferentes cosas. Todo contacto necesita al menos dos partes; no hay forma en que un objeto pueda ejercer una fuerza sobre nada. Las fuerzas, ya sean grandes empellones o ligeros empujoncitos, siempre ocurren en pares, cada uno de los cuales es opuesto al otro. Por ende, no puedes tocar sin ser tocado.

P U N T O D E C O N T R O L

F I G U R A 5 . 1 9

El autor y su esposa Lil demuestran la

1. Un automóvil acelera sobre una carretera. Identifica la fuerza que mueve *tercera ley de Newton: no puedes tocar*

al automóvil.

sin ser tocado.

2. Un autobús a gran rapidez y un inocente bicho tienen una colisión frontal. La fuerza del impacto aplasta al pobre bicho contra el parabrisas. ¿La fuerza correspondiente que el bicho ejerce contra el parabrisas es mayor, menor o igual? ¿La desaceleración resultante del autobús es mayor, menor o igual que la del bicho?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *La carretera es la que empuja sobre el automóvil. ¡Es verdad! Sólo la carretera proporciona la fuerza horizontal que mueve al automóvil hacia adelante. ¿Cómo hace esto? Las llantas giratorias del automóvil empujan hacia atrás sobre la carretera (acción). El camino simultáneamente empuja hacia adelante sobre las llantas (reacción). ¡Qué tal!*

2. *Las magnitudes de ambas fuerzas son iguales porque componen un par de fuerzas acción-reacción que constituye la interacción entre el autobús y el bicho. Sin embargo, las aceleraciones son muy diferentes, porque las masas son distintas. El bicho experimenta una desaceleración enorme y mortal, en tanto que el autobús* ***F I G U R A 5 . 2 0***

experimenta una desaceleración muy pequeña, tan pequeña que el muy leve Los ladrillos originalmente estaban rec-frenado del autobús pasa desapercibido para sus pasajeros. Pero si el bicho fuese tos. ¿Ves la prueba de que los automóvi-más masivo (tan masivo como otro autobús, por ejemplo), el frenado desafortu-les empujan hacia atrás sobre el camino

nadamente sería muy notorio. (¿Puedes ver la maravilla de la física aquí? Aunque cuando aceleran hacia adelante? ¿O que

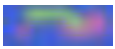
es muy diferente para el bicho y el autobús, la cantidad de fuerza que encuentra empujan hacia adelante sobre el camino

cada uno es la misma. ¡Sorprendente!)

cuando frenan?

PRACTICANDO LA FÍSICA: GUERRA DE JALAR LA SOGA

Realiza una competencia de jalar la soga entre chicos y chicas. Realízala sobre un piso pulido que esté un poco resbaloso, y que los muchachos usen calcetines y las muchachas zapatos con suela de caucho. ¿Quién seguramente ganará y por qué? (Sugerencia: ¿quién gana una competencia de jalar la soga: quienes empujan más fuerte sobre la soga o quienes empujan más fuerte contra el suelo?)



5.4 *Vectores y la tercera ley*

Tal como un par de vectores en ángulo recto pueden combinarse en un vector resultante, cualquier vector puede descomponerse en dos vectores componentes perpendiculares entre sí. Estos dos vectores se conocen como los ***componentes*** *de un vector dado, al que sustituyen (Figura 5.21). El proceso de determinar los componentes de un vector se denomina descomposición. Cualquier vector dibujado en una hoja de papel puede descomponerse en un componente vertical y uno horizontal.*

F y

F

F I G U R A 5 . 2 1

La fuerza F que Nellie ejerce sobre el

trineo tiene un componente horizontal

F

F

x y un componente vertical F y. (No se

x

muestran otras fuerzas sobre el trineo.)

La resolución de vectores se ilustra en la Figura 5.22. Un vector ***V*** *se dibuja en la dirección adecuada para representar una cantidad vectorial. Luego se trazan líneas verticales y horizontales (ejes) en el origen del vector. A continuación se dibuja un rectángulo que tiene a* ***V*** *como su diagonal. Los lados de este rectángulo son los componentes deseados, V x y V y. Observa que la suma vectorial de los vectores V x y V y es* ***V****.*

V

V

V

V y

V x

F I G U R A 5 . 2 2

Construcción de los componentes vertical y horizontal de un vector.

P U N T O D E C O N T R O L

Con una regla, dibuja los componentes vertical y horizontal de los dos vectores mostrados. Mide los componentes y compara tus hallazgos con las respuestas que se dan a continuación.

R E S P U E S T A S

Vector izquierdo: el componente horizontal mide 2 cm; el componente vertical, 2.6 cm. Vector derecho: el componente horizontal mide 3.8 cm; el componente vertical, 2.6 cm.

C A PÍ T U LO 5 T ERCER A L E Y D E N E W TO N D E M OV I M I EN TO

83

F I G U R A 5 . 2 3

N

(a) Nellie Newton presiona contra la

superficie, mg (acción), y la superficie

N

N

presiona sobre Nellie, N (reacción). De

modo que mg y N son iguales y opues-

tas. (b) Nellie presiona con menos fuerza

contra la superficie inclinada, por lo que

en el modo de acción-reacción, la fuerza

normal N es correspondientemente

más pequeña. (c) El componente de mg

perpendicular a la superficie inclinada

(a)

(b)

(c)

tiene la misma magnitud que N; el com-

ponente de mg paralelo a la superficie

mg

mg

mg

proporciona aceleración.

En capítulos anteriores se usaron vectores para ilustrar las fuerzas de peso y normal de objetos sobre superficies de sostén. Cuando una superficie es horizontal y sólo la gravedad actúa sobre un objeto, la fuerza normal ejercida por la superficie tiene la misma magnitud que mg, la fuerza debida a la gravedad. La esquiadora de snowboar-VIDEO: Representación vectorial:

ding, Nellie Newton, ilustra esto en la Figura 5.23a. La tercera ley de Newton es evi-cómo sumar y restar vectores

dente pues el peso mg de Nellie es la fuerza que ella ejerce contra la superficie, en tanto que la reacción es la superficie que ejerce una fuerza N igual y opuesta sobre Nellie.

Sin embargo, supón que Nellie está sobre una superficie inclinada, como una colina (Figura 5.23b). El vector mg es vertical y actúa hacia abajo, con un solo componente de mg que presiona contra la superficie. De modo que la fuerza normal N es menor. Si, por ejemplo, la superficie fuese vertical, no ocurriría presión y N sería cero.

Observa otra cosa. El componente de mg perpendicular a la superficie tiene la mis-VIDEO: Suma geométrica

ma magnitud que N (Figura 5.23c). Observa también que la aceleración de Nellie ***de vectores***

hacia abajo de la colina se debe al componente de mg que es paralelo a la superficie de la colina. En el caso de colinas más inclinadas, este componente de mg y su aceleración serían mayores. Si la superficie fuese vertical, ¡la aceleración sería un g completo y Nellie estaría en caída libre! Un bloque de hielo sobre varios planos inclinados sin fricción ilustra esta disminución de N en pendientes más pronunciadas (Figura 5.24).

N

F I G U R A 5 . 2 4

N

A medida que se vuelve más pronun-

ciada la inclinación del plano, la fuerza

normal N sobre un bloque de hielo

N

disminuye, y N es cero cuando el plano

inclinado es vertical.

mg

mg

mg

mg

En la Figura 5.25 se muestran tres tomas de un zapato sobre un plano inclinado, primero sobre una superficie sin fricción donde sólo dos fuerzas actúan sobre el zapato (Figura 5.25a). Cuando hay fricción, un vector adicional f representa la fuerza de fricción (Figura 5.25b). Es interesante saber si la cantidad de fricción es menor que o igual ***SCREENCAST: Vectores de fuerza***

a la resultante de N y mg (Figura 5.25c). Si f es igual a la resultante el zapato estará en ***sobre un plano inclinado***

equilibrio, lo que puede significar que está en reposo, o que si se le da un empujoncito, se desliza por el plano con velocidad constante. Es probable que en la parte de laboratorio de tu curso experimentes con estas ideas.

En la Figura 5.26 se puede ver al mono Mo suspendido en reposo en un zoológi -

co, sujetado de una soga con una mano y del lado de la jaula con la otra. La aplicación de la regla del paralelogramo muestra que la tensión T en la soga es mayor que mg.

F I G U R A 5 . 2 5

N

N

N

(a) Sobre hielo sin fricción, sólo mg y N

actúan sobre el zapato. (b) Sobre la tabla

de madera, está presente una fuerza de

fricción f. (c) En el equilibrio, la resul-

tante de N y mg es igual y opuesta a f.

f

f

Hielo

(a)

(b)

(c)

mg

mg

mg

F I G U R E 5 . 2 6

El mono Mo y las tres fuerzas que

T

T

proporcionan equilibrio.

S

S

mg

mg

Observa que el jalón lateral S sobre la jaula es menor que mg. Aunque no se indica en la figura, ¿puedes ver que S es igual al componente horizontal de T ? ¿Y que mg es igual al componente vertical de T ? Analizar fuerzas en términos de vectores y sus componentes es muy ilustrativo.

La Figura 5.27 ilustra los componentes vectoriales de la velocidad. En ausencia de resistencia del aire, el componente horizontal de velocidad permanece constante, en concordancia con la primera ley de Newton. Por el contrario, el componente vertical está bajo la influencia de la gravedad y disminuye con el movimiento ascendente y gana lo que pierde en el movimiento descendente.

En el Capítulo 10.se analizan de nuevo los componentes vectoriales de la velocidad, cuando se aborda el movimiento de proyectiles.

F I G U R A 5 . 2 7

Velocidad de la piedra

Los componentes horizontal y vertical

de la velocidad de una piedra lanzada.

Componente

vertical de velocidad

de la piedra

Componente horizontal

de velocidad de la piedra

***5.5** Resumen de las tres leyes de Newton*

Primera ley de Newton, la ley de la inercia: un objeto en reposo tiende a permanecer en reposo; un objeto en movimiento tiende a permanecer en movimiento con rapidez constante a lo largo de una trayectoria en línea

recta. Esta propiedad de los objetos a resistir el cambio de movimiento se llama inercia. La masa es una medida de inercia. Los objetos experimentarán cambios de movimiento sólo en presencia de una fuerza neta.

Segunda ley de Newton, la ley de aceleración: cuando una fuerza neta actúa sobre un objeto, el objeto acelerará. La aceleración es directamente proporcional a la fuerza neta e inversamente proporcional a la masa. De manera simbólica, $a = F/m$.

La aceleración siempre es en la dirección de la fuerza neta. Cuando los objetos caen ***FIGURA 5.28***

en el vacío, la fuerza neta es simplemente el jalón de la gravedad, y la aceleración es g Los gansos vuelan en una formación (el símbolo g denota que la aceleración se debe a la gravedad sola). Cuando los objetos en V porque el aire que empujan hacia abajo en la punta de sus alas gira

caen en el aire, la fuerza neta es igual al jalón de la gravedad menos la fuerza de la hacia arriba, lo que crea una corriente resistencia del aire, y la aceleración es menor que g. Si la fuerza de la resistencia del ascendente que es más fuerte hacia el aire es igual a la fuerza gravitacional sobre un objeto que cae, la aceleración termina y lado del ave. Un ave rezagada consi-el objeto cae con rapidez constante (llamada rapidez terminal).

gue sustentación adicional si se coloca

Tercera ley de Newton, la ley de acción-reacción: siempre que un objeto ejerce una en esta corriente ascendente, empuja fuerza sobre un segundo objeto, el segundo objeto ejerce una fuerza igual y opuesta aire hacia abajo y crea otra corriente sobre el primero. Las fuerzas ocurren en pares, una acción y la otra reacción, que en ascendente para la siguiente ave, etc. El resultado es una parvada que vuela en

conjunto constituyen la interacción entre un objeto y el otro. Acción y reacción siem- una formación en V.

pre ocurren de manera simultánea y actúan sobre diferentes objetos. Ninguna fuerza existe sin la otra.

Las tres leyes de Isaac Newton de movimiento son reglas de la naturaleza que permiten ver la manera tan hermosa como tantas cosas se conectan con otras. En el entorno cotidiano se observan estas reglas en acción.

RESUMEN DE TÉRMINOS *(CONOCIMIENTO)*

Tercera ley de Newton. *Siempre que un objeto ejerce una*

Componentes. *Vectores perpendiculares entre sí, por lo*

fuerza sobre un segundo objeto, el segundo objeto ejerce

general horizontal y vertical, cuya suma vectorial es un

una fuerza igual y opuesta sobre el primero.

vector dado.

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S *(C O M P R E N S I Ó N)*

5.1 Fuerzas e interacciones

7. Si se considera que el sistema es la manzana y la naranja

1. Cuando empujas contra una pared con los dedos, éstos se

en conjunto (Figura 5.10), ¿existe una fuerza neta sobre

doblan porque experimentan una fuerza. Identifica esta

el sistema cuando la manzana jala (ignora la fricción

fuerza.

con el suelo)?

2. Un boxeador puede golpear un pesado saco con gran

8. Para producir una fuerza neta sobre un sistema, ¿debe

fuerza. ¿Por qué no puede golpear un papel de seda en el

haber una fuerza neta aplicada externamente?

aire con la misma cantidad de fuerza?

9. Considera al sistema de un solo balón de fútbol. Si lo

3. ¿Cuántas fuerzas se necesitan para una interacción?

pateas, ¿existe una fuerza neta que acelere el sistema? Si

un amigo lo patea al mismo tiempo con una fuerza igual

5.2 Tercera ley de Newton de movimiento

y opuesta, ¿existe una fuerza neta que acelere el sistema?

4. Enuncia la tercera ley de Newton de movimiento.

5.3 Acción y reacción sobre masas diferentes

5. Piensa que golpeas una pelota de béisbol con un bate. Si a

la fuerza del bate contra la bola la llamas fuerza de acción, 10. La Tierra jala hacia abajo sobre ti con una fuerza

identifica la fuerza de reacción.

gravitacional que llamas tu peso. ¿Tú jalas hacia arriba a

6. Si el sistema de la Figura 5.9 sólo es la naranja, ¿existe

la Tierra con la misma cantidad de fuerza?

una fuerza neta sobre el sistema cuando la manzana jala?

11. Si las fuerzas que actúan sobre una bala de cañón y sobre

17. ¿Cuán grande es la fuerza de fricción que actúa sobre un

el cañón que recula, desde el cual se dispara, son iguales

zapato en reposo sobre un plano inclinado, comparada

en magnitud, ¿por qué la bala de cañón y el cañón tienen

con la resultante de los vectores mg y N?

aceleraciones muy diferentes?

18. ¿Cómo cambia la magnitud del componente vertical

12. Identifica la fuerza que impulsa un cohete.

de velocidad para una bola lanzada en un ángulo hacia

13. ¿Cómo es que un helicóptero obtiene su fuerza de

arriba a medida que la bola viaja en dicha dirección? ¿Y el

sustentación?

componente horizontal de velocidad cuando la resistencia

14. ¿Puedes tocar físicamente a una persona sin que la

del aire es despreciable?

persona te toque con la misma cantidad de fuerza?

5.5 Resumen de las tres leyes de Newton

5.4 Vectores y la tercera ley

19. Llena los espacios: la primera ley de Newton con

15. ¿Qué se entiende con el término descomposición de

frecuencia se llama ley de

; la segunda ley de

vectores?

Newton es la ley de

, y la tercera ley de Newton

16. ¿Qué ocurre con la magnitud del vector normal arriba

es la ley de

y

.

de un bloque en reposo sobre un plano inclinado cuando

20. ¿Cuál de las tres leyes de Newton se centra en las

aumenta el ángulo de inclinación?

interacciones?

P I E N S A Y R E A L I Z A *(A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 21. Sostén tu mano como un ala plana afuera de la ventana*

22. Intenta empujar tus dedos unos contra otros. ¿Puedes

de un automóvil en movimiento. Luego inclina

empujar más fuerte sobre un dedo que sobre el otro?

ligeramente hacia arriba el borde frontal y observa el

efecto de sustentación. ¿Puedes ver cómo funcionan aquí

las leyes de Newton?

S U S T I T U Y E Y L I S T O *(F A M I L I A R I Z A C I Ó N C O N E C U A C I O N E S) 23. Calcula la resultante del par de velocidades de 100 km/h*

25. Calcula la resultante de un vector horizontal con una

norte y 75 km/h sur. Calcula la resultante si ambas

magnitud de 4 unidades y un vector vertical con

velocidades se dirigen hacia el norte.

una magnitud de 3 unidades.

Resultante de dos vectores en ángulos rectos entre sí:

26. ¿Cuál será la rapidez de un avión que normalmente vuela

a 200 km/h, cuando encuentra un viento de lado de

$R = X2 + Y\,2$

80 km/h (en ángulo recto con el avión)?

24. Calcula la magnitud de la resultante de un par de

vectores de velocidad de 100 km/h que están en ángulos

rectos entre sí.

P I E N S A Y R E S U E L V E *(A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C*

A) 27. Un boxeador golpea una hoja de papel a mitad del aire

30. Cuando dos discos de aire idénticos, con imanes

y la lleva desde el reposo hasta una rapidez de 25 m/s

repelentes, se mantienen juntos en una mesa de aire y

en 0.05 s. (a) ¿Qué aceleración se imparte al papel?

luego se sueltan, terminan moviéndose en direcciones

(b) Si la masa del papel es 0.003 kg, ¿qué fuerza ejerce

opuestas con la misma rapidez, v. Supón que la masa de

el boxeador sobre él? (c) ¿Cuánta fuerza ejerce el papel

uno de los discos se duplica y que el procedimiento se

sobre el boxeador?

repite.

28. Si estás de pie junto a una pared sobre una patineta sin

a. De acuerdo con la tercera ley de Newton, demuestra

fricción y empujas la pared con una fuerza de 40 N,

que la rapidez final del disco con el doble de masa es la

¿cuán fuerte empuja la pared sobre ti? Si tu masa es de

mitad que la del disco sencillo.

80 kg, demuestra que tu aceleración es 0.5 m/s2.

b. Calcula la rapidez del disco con masa doble si el disco

29. Fuerzas de 3 N y 4 N actúan en ángulos rectos sobre un

sencillo se aleja a 0.4 m/s.

bloque de 2 kg de masa. Demuestra que la aceleración

del bloque es 2.5 m/s2.

C A PÍ T U LO 5 R E V ISI Ó N

87

P I E N S A Y C L A S I F I C A *(A N Á L I S I S)*

31. Una camioneta ejerce una fuerza sobre remolques de

a. La aceleración de las cajas.

diferentes masas m. Comparadas con la fuerza ejercida

A

B

sobre cada remolque, clasifica las magnitudes de las

fuerzas que cada remolque ejerce sobre la camioneta.

F

F

(¿O todas son pares de fuerzas con igual magnitud?)

C

A

B

F

b. Las tensiones de las sogas conectadas a las cajas

individuales a la derecha en B y en C.

$m = 1{,}000\ kg\ v = 20\ m/s$

$m = 1{,}500\ kg\ v = 20\ m/s$

33. Tres discos idénticos, A, B y C, se deslizan por el hielo

con las rapideces dadas. Las fuerzas del aire y de la

C

fricción del hielo son despreciables.

a. Clasifica los discos por la fuerza necesaria para

mantenerlos en movimiento, de mayor a menor.

$m = 1{,}800\ kg\ v = 15\ m/s$

b. Clasifica los discos por la fuerza necesaria para

detenerlos en el mismo intervalo, de mayor a menor.

32. Cada una de estas cajas es jalada por la misma fuerza F

hacia la izquierda. Todas las cajas tienen la misma masa

2 m/s

4 m/s

6 m/s

y se deslizan sobre una superficie sin fricción. Clasifica lo

siguiente de mayor a menor:

A

B

C

***PIENSA Y EXPLICA** (SÍNTESIS)*

34. En cada una de las siguientes interacciones, identifica las fuerzas de acción y reacción: (a) Un martillo golpea un clavo. (b) La gravedad de la Tierra jala hacia abajo sobre un libro. (c) Las aspas de un helicóptero empujan el aire hacia abajo.

35. La fotografía muestra a Steve Hewitt con su hija Gretchen. ¿Gretchen toca a su padre, o su padre la toca a ella? Explica.

36. Cuando te frotas las manos, ¿puedes empujar más fuerte

40. ¿Cuál es la física involucrada en el caso de un pasajero que se siente presionado hacia atrás contra el asiento de un avión cuando éste acelera en la pista durante el despegue?

41. Si sueltas una bola de caucho sobre el suelo, rebota de vuelta hacia arriba. ¿Qué fuerza actúa sobre la bola para proporcionar el rebote?

42. En el interior de un libro que está sobre una mesa hay miles de millones de fuerzas que empujan y jalan sobre todas las moléculas. ¿Por qué dichas fuerzas nunca por casualidad suman una fuerza neta en una dirección, lo que haría que el libro acelerara "espontáneamente" a través de la mesa?

43. Si ejerces una fuerza horizontal de 200 N para deslizar con velocidad constante una caja por el suelo de una fábrica, ¿cuánta fricción ejerce el suelo sobre la caja? ¿La fuerza de fricción es igual y con dirección opuesta a tu

empuje de 200 N? Si la fuerza de fricción no es la fuerza

sobre una mano que sobre la otra?

de reacción a tu empuje, ¿qué es?

37. Sostienes una manzana sobre tu cabeza. (a) Identifica

44. Cuando el deportista sostiene la barra de pesas

todas las fuerzas que actúan sobre la manzana y sus

sobre su cabeza, la fuerza de reacción es el peso

fuerzas de reacción. (b) Cuando sueltas la manzana,

de la barra de pesas sobre su mano. ¿Cómo

identifica todas las fuerzas que actúan sobre ella cuando

varía esta fuerza en el caso en el que la barra

cae y las correspondientes fuerzas de reacción. Desprecia

de pesas se acelera hacia arriba? ¿Hacia abajo?

el arrastre aerodinámico.

45. Considera las dos fuerzas que actúan sobre

38. Identifica los pares de fuerzas acción-reacción en las

una persona que está de pie quieta, a saber, el

siguientes situaciones: (a) Bajas de una acera. (b) Das una

jalón descendente de la gravedad y el soporte

palmada en la espalda a tu tutor. (c) Una ola golpea una

ascendente del suelo. ¿Estas fuerzas son iguales

costa rocosa.

y opuestas? ¿Forman un par acción-reacción?

39. Piensa en un jugador de béisbol que batea una pelota.

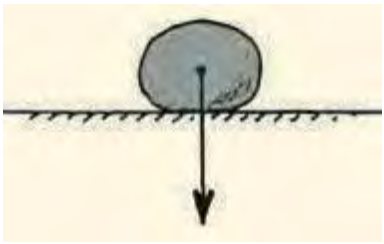
¿Por qué sí o por qué no?

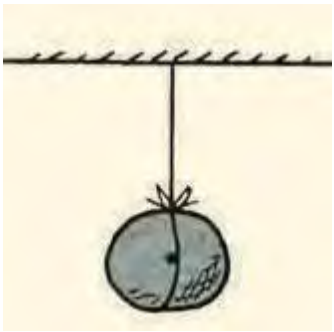
Identifica los pares acción-reacción (a) cuando se golpea

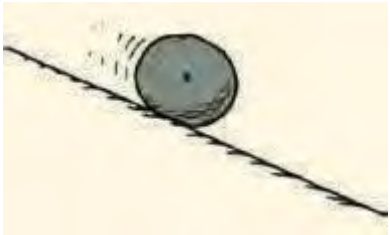
46. ¿Por qué puedes ejercer mayor fuerza sobre los pedales de

la pelota y (b) mientras la pelota está en vuelo.

una bicicleta si te enderezas en el manubrio?







PA R T E U

E U N O

M EC

EC Á N I C A

47. ¿Por qué un escalador tira hacia abajo sobre la soga para

hacia la otra. ¿Cómo se comparan sus aceleraciones y

moverse hacia arriba?

cuánto se desliza cada persona antes de encontrarse?

48. Empujas un pesado automóvil con las manos. El

57. ¿Qué aspecto de la física no sabía el escritor de esta editorial

automóvil, a su vez, te empuja de vuelta con una fuerza

de periódico que ridiculizaba los primeros experimentos de

igual y opuesta. ¿Esto no significa que las fuerzas

Robert H. Goddard acerca de la propulsión de cohetes

se cancelan mutuamente, lo que hace imposible la

sobre la atmósfera de la Tierra?: “El profesor Goddard. . no

aceleración? ¿Por qué sí o por qué no?

conoce la relación entre acción y reacción, ni la necesidad

49. El hombre fuerte empujará para separar los dos vagones

de tener algo mejor que un vacío contra el cual reaccionar. .

de carga de igual masa, inicialmente estacionarios, antes de

parece carecer del conocimiento que se imparte diariamente

caer recto hacia el suelo. ¿Es posible que él dé a alguno de

en los bachilleratos".

los vagones una mayor rapidez que al otro? ¿Por qué sí o

58. ¿Por qué la lluvia que cae verticalmente forma bandas

por qué no?

diagonales sobre las ventanas laterales de un automóvil

en movimiento? Si las bandas forman un ángulo de 45,

¿qué te dice esto acerca de las rapideces relativas del

automóvil y la lluvia que cae?

59. Un globo aerostático flota sin movimiento en el aire. Un

aeronauta comienza a ascender por el cable de sostén. ¿En

cuál dirección se mueve el globo conforme asciende el

50. Supón que dos carros, uno con el doble de masa que el otro,

aeronauta? Defiende tu respuesta.

se separan cuando se suelta el resorte comprimido que los

60. Hay dos interacciones en una piedra que está en

une. ¿Cuál es la aceleración del carro más pesado en relación

reposo sobre el suelo. Una es entre la piedra y la Tierra

con la del carro más ligero a medida que se separan?

como totalidad: la Tierra jala hacia abajo sobre la

piedra (mg) y la piedra jala hacia arriba sobre la Tierra.

¿Cuál es la otra interacción?

m

2 m

61. Una piedra se muestra en reposo

sobre el suelo. (a) El vector

51. Si un camión y un automóvil compacto tienen una

muestra el peso de la piedra. Para

colisión frontal, ¿sobre cuál vehículo es mayor la

completar el diagrama vectorial

fuerza de impacto? ¿Cuál vehículo experimenta mayor

muestra otro vector que resulte en

desaceleración? Explica tus respuestas.

fuerza neta cero sobre la piedra.

52. Ken y Joanne son astronautas que flotan separados cierta

(b) ¿Cuál es el nombre convencional

distancia en el espacio. Están unidos mediante una

del vector que dibujaste?

cuerda de seguridad cuyos extremos están amarrados

62. Una piedra está suspendida en reposo

alrededor de sus cinturas. Si Ken comienza a jalar sobre

mediante una cuerda. (a) Dibuja

la cuerda, ¿jalará a Joanne hacia él, o él se jalará hacia

vectores de fuerza para todas las fuerzas

Joanne, o ambos astronautas se moverán? Explica.

que actúen sobre la piedra. (b) ¿Tus

53. ¿Cuál equipo gana en una competencia de jalar la soga:

vectores deben tener un resultante cero?

el equipo que jala más duro sobre la soga o el equipo que

(c) ¿Por qué sí o por qué no?

empuja más duro contra el suelo? Explica.

63. La misma piedra se acelera verticalmente

54. En una competencia de jalar la soga entre Sam y Maddy,

hacia arriba. (a) Dibuja vectores de fuerza

cada uno jala sobre la soga con una fuerza de 250 N.

con alguna escala adecuada que muestren las

¿Cuál es la tensión en la soga? Si ambos permanecen

fuerzas relativas que actúan sobre la piedra.

inmóviles, ¿qué fuerza horizontal ejerce cada uno contra

(b) ¿Cuál es el vector más largo y por qué?

el suelo?

64. Supón que la cuerda del ejercicio anterior

55. Tu instructor lanza el reto de que tú y tu amigo jalen

se rompe y la piedra detiene su movimiento

cada uno sobre un par de básculas unidas a los extremos

hacia arriba. Dibuja un diagrama de vectores de fuerza de

de una soga horizontal, en forma parecida a una

la piedra cuando llega a la parte superior de su trayectoria.

competencia de jalar la soga, de modo que las lecturas en

65. ¿Cuál es la aceleración de la piedra del ejercicio anterior

las básculas diferirán. ¿Puede hacerse esto? Explica.

en la parte superior de su trayectoria?

66. Aquí la piedra se desliza hacia

abajo sobre un plano inclinado sin

?

fricción. (a) Identifica las fuerzas que

?

actúan sobre el a y dibuja vectores

de fuerza adecuados. (b) Usa la

regla del paralelogramo para construir la fuerza resultante

56. Dos personas de igual masa intentan jugar a jalar una soga

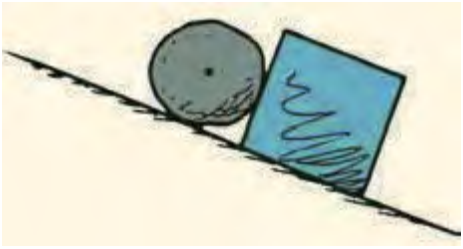
sobre la piedra (que muestre cuidadosamente que tiene una

de 12 m mientras están paradas sobre hielo sin fricción.

dirección paralela al plano inclinado, la misma dirección

Cuando jalan sobre la soga, cada una de ellas se desliza

que la aceleración de la piedra).



C A PÍ T U LO 5

LO 5 R

E V ISI Ó N

67. La piedra está en reposo

70. Observa al mono Mo de la Figura 5.26. ¿Cuál será la

e interactúa tanto con

magnitud del vector S si la soga que sostiene a Mo es

la superficie del plano

vertical? Si la soga fuese horizontal, ¿cómo sería diferente

inclinado como con el

el vector S? ¿Por qué los vectores T y S no pueden ser bloque. (a) Identifica

ambos horizontales?

todas las fuerzas que

71. Una niña lanza una bola hacia arriba en la Figura 5.27.

actúan sobre la piedra y dibuja vectores de fuerza

Si el arrastre aerodinámico es despreciable, ¿cómo se

adecuados. (b) Demuestra que la fuerza neta sobre la

relaciona el componente horizontal de velocidad con la

piedra es cero. (Sugerencia 1: existen dos fuerzas normales

primera ley de Newton de movimiento?

sobre la piedra. Sugerencia 2: asegúrate de que los

72. Conforme una bola lanzada viaja por el aire, una fuerza

vectores que dibujes sean para fuerzas que actúan sobre la

de gravedad mg actúa sobre ella. Identifica la reacción a

piedra, no por la piedra sobre las superficies.)

esta fuerza. Identifica también la aceleración de la bola

68. En la Figura 5.25, ¿cómo se relaciona la magnitud de f

a lo largo de su trayectoria, incluso en la parte superior

con la suma vectorial de mg y N cuando el zapato está en de su trayectoria.

equilibrio? ¿Qué ocurre si f es menor que esta suma?

69. Observa al mono Mo de la Figura 5.26. Si la soga forma

un ángulo de 45 con la vertical, ¿cuál será la diferencia

de las magnitudes de los vectores S y mg?

P I E N S A Y D I S C U T E *(E V A L U A C I Ó N)*

73. Un cohete se vuelve progresivamente más fácil de acelerar

78. Un bate de béisbol se abanica contra una pelota de

conforme viaja a través del espacio. Discute por qué

béisbol, la cual acelera. Cuando la bola es atrapada,

sucede esto. (Sugerencia: cerca de 90% de la masa de un

¿qué produce la fuerza sobre el guante del jugador?

cohete recién lanzado es combustible.)

79. Un campesino urge a su caballo para que jale un vagón.

74. Cuando pateas un balón de fútbol, ¿qué fuerzas de acción

El caballo se rehúsa y dice que tratarlo sería inútil,

y reacción están involucradas? ¿Cuál fuerza, si la hay, es

pues desobedecería la tercera ley de Newton. El caballo

mayor?

concluye que no puede ejercer una fuerza mayor sobre el

75. ¿Es cierto que, cuando caes de una rama hacia el suelo,

vagón que la que el vagón ejerce sobre él y, por tanto, que

jalas hacia arriba sobre la Tierra? Si es así, ¿entonces por

no podrá acelerar el vagón. Discute tu razonamiento para

qué la aceleración de la Tierra no se aprecia?

convencer al caballo de que jale.

76. Dos pesos de 100 N están unidos a un dinamómetro

80. El hombre fuerte puede soportar la fuerza de tensión

como se muestra. ¿El dinamómetro lee 0, 100 o 200 N, o

ejercida por los dos caballos que jalan en direcciones

proporciona alguna otra lectura? (Sugerencia: ¿la lectura

opuestas. ¿Cómo se

sería diferente si una de las sogas estuviera atada a la

compararía la tensión

pared en lugar de estarlo al peso colgante de 100 N?)

si sólo un caballo

jalara y la soga

izquierda estuviera

amarrada a un árbol?

¿Cómo se compararía

la tensión si los dos

caballos jalaran en

100 N

100 N

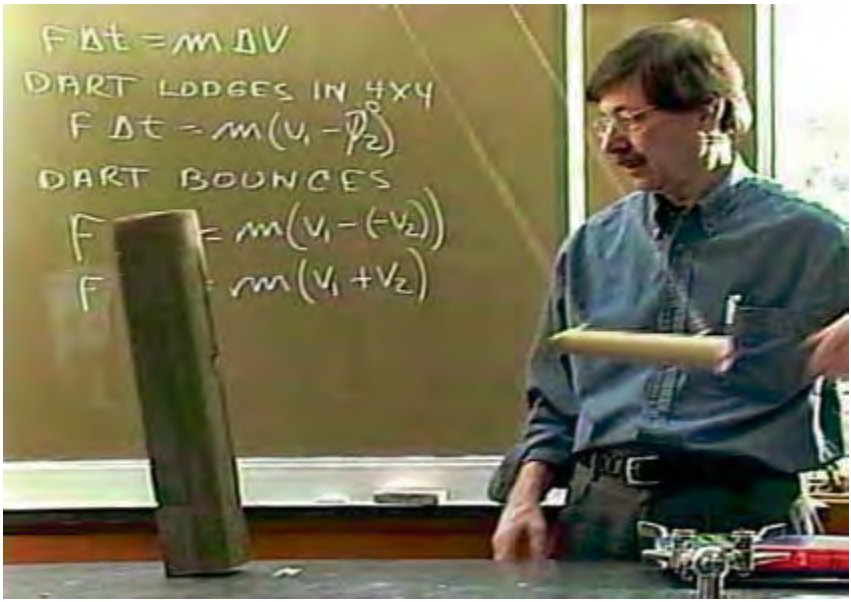
la misma dirección,

con la soga izquierda

77. ¿Un bate de béisbol frena cuando golpea una pelota?

amarrada al árbol?

Discute y defiende tu respuesta.



6 ***1***

C A P Í T U L O 6

Cantidad de ***2***

movimiento

6.1

Cantidad de movimiento

3

6.2

Impulso

6.3

El impulso cambia la cantidad de

movimiento

6.4

Rebote

6.5

Conservación de la cantidad de movimiento

6.6

Colisiones

4

6.7

Colisiones más complicadas

1 *El impulso descendente de los chorros de agua produce una cantidad de movimiento ascendente que permite a Derek Muller flotar en el aire.* ***2*** *Howie Brand demuestra los diferentes resultados cuando un dardo rebota en un bloque de madera en lugar de quedar pegado a él. Un dardo que rebota produce más impulso, lo que inclina el bloque.* ***3*** *Lo mismo sucede con la rueda Pelton, donde el agua que rebota de los álabes curvos produce más impulso, lo que imparte más cantidad de movimiento a la rueda.* ***4*** *La cantidad de movimiento es masa por rapidez, como muestra Alex Hewitt con su patineta.*

los estudiantes de la física

elemental. Descubrió que

Derek Muler descubrió el camino que lo llevó a la

enseñanza de la física gracias a sus tres pasiones:

comprender el mundo, ayudar a otros y hacer pelí-

el problema no tenía que

culas. En su niñez, estaba obsesionado con las aplicaciones

ver con la física. Luchar

prácticas de los fenómenos naturales. En lugar de jugar con

contra las malas inter-

juguetes, plantaba jardines con plantas comestibles, cultiva-

pretaciones científicas del

ba gusanos de seda por sus preciados capul os y aprendió a

público general se convir-

fabricar vajil as de cerámica que usaba cuando comía sus cul-

tió en la labor de Derek.

tivos. Estaba intrigado con la ciencia, que le parecía mágica.

Para superar las malas

La temprana inspiración de Derek por la enseñanza pro-

interpretaciones frecuentes

vino de sus dos hermanas mayores, quienes le enseñaron y al anar el camino hacia habilidades y el aprecio por la enseñanza esmerada. Más el aprendizaje, Derek creó adelante, en la secundaria y el bachil erato, tomó el papel de

un canal en YouTube lla-

profesor y transmitió su conocimiento científico a amigos y

mado Veritasium. En este

compañeros. Al brindar asesorías, experimentó la satisfac-

canal publica videos científicos, en particular de física, en los

ción de enseñar bien un concepto y valoró el sentimiento de

que involucra al público general en discusiones animadas. En

ser útil. Su ruta lo condujo, entonces, a la educación en física.

los videos, Derek hace notar contradicciones que impiden

Después de obtener su grado en Ingeniería Física en despertar el asombro que provoca la comprensión. Con este Queens University en Kingston, Canadá, Derek se mudó a

enfoque, Derek creó más de 130 videos, que se han visto más

Australia, donde obtuvo su doctorado en investigación para

de 17 mil ones de veces. A nivel mundial, el canal de Derek

la enseñanza de la física en la Universidad de Sidney. Como está clasificado en los mejores 1,000, con más de 300,000 parte de su investigación doctoral, estudió la efectividad de suscriptores (al momento de que este libro está en prensa). los videos científicos en línea. Para su sorpresa, descubrió En este momento de transición en los métodos de ense- que la mayoría de los estudiantes novatos no aprendía nada ñanza, la comunidad física tiene un gran pionero en Derek de física con las lecciones de física en video (en descargo de Mul er, quien verdaderamente descubrió una forma efecti- responsabilidad, mis videos de física conceptual no fueron va para que el público en todo el mundo valore y compren- parte de su estudio). Derek identificó lo que consideró la da la física. raíz del problema: las interpretaciones erróneas que hacían

6.1 *Cantidad de movimiento*

Todo mundo sabe que es más difícil detener un camión pesado que un automóvil pequeño que se mueve con la misma rapidez. Para describir este hecho se dice que el camión tiene más cantidad de movimiento que el automóvil. Y si dos automóviles tienen la misma masa, el más rápido es más difícil de detener que el más lento. De modo que también se dice que el automóvil que se mueve más rápido tiene más cantidad de movimiento que el automóvil más lento. Por ***cantidad de movimiento*** *se entiende inercia en movimiento. De manera más específica, la cantidad de movimiento se define como el producto de la masa de un objeto y su velocidad:*

Cantidad de movimiento 5 masa 3 velocidad

O, en notación abreviada,

Cantidad de movimiento 5 mv

Cuando la dirección no es un factor importante, es posible decir

Cantidad de movimiento 5 masa 3 rapidez

que se sigue abreviando mv.

En la definición se puede ver que un objeto en movimiento puede tener una gran cantidad de movimiento si su masa o su velocidad es grande, o si tanto su masa como su velocidad son grandes. El camión tiene más cantidad de movimiento que el automóvil que se mueve con la misma rapidez porque el camión tiene mayor masa. Puedes ver que ***F I G U R A 6 .1***

un gran barco que se mueve con una rapidez pequeña puede tener una gran cantidad La roca, por desgracia, tiene más canti-de movimiento, como la puede tener una pequeña bala que se mueve con gran rapidez. dad de movimiento que el corredor.

F I G U R A 6 . 2

¿Por qué los motores de un gran conte-

nedor suelen apagarse a 25 km del puer-

to? Es muy importante saber encontrar

el momento oportuno cuando se cambia

la cantidad de movimiento.

Y, desde luego, un objeto enorme que se mueve con una gran rapidez, como un camión masivo que rueda colina abajo sin frenos, tiene una cantidad de movimiento enorme, en tanto que el mismo camión en reposo no tiene cantidad de movimiento en absoluto ***VIDEO: Definición de cantidad***

porque el término v en mv es cero.

de movimiento

6.2 *Impulso*

Si la cantidad de movimiento de un objeto cambia, entonces la masa o la velocidad o ambas cambian. Si la masa permanece invariable, como suele suceder, entonces la velocidad cambia y ocurre una aceleración. ¿Qué produce esa aceleración? Sabes que la respuesta es la fuerza. Cuanto mayor sea la fuerza neta que actúa sobre un objeto, mayor ***F I G U R A 6 . 3***

es el cambio de velocidad en un intervalo de tiempo dado y, en consecuencia, mayor es Cuando empujas con la misma fuerza

su cambio en cantidad de movimiento.

durante el doble de tiempo, impartes el

Pero hay algo más que es importante para cambiar la cantidad de movimiento: el doble de impulso y produces el doble de

tiempo, es decir, durante cuánto tiempo actúa la fuerza. Si aplicas una fuerza breve a un cambio en la cantidad de movimiento.

automóvil que está parado, produces un cambio en su cantidad de movimiento. Aplica la misma fuerza durante un periodo más prolongado y produces un cambio más grande en la cantidad de movimiento del automóvil. Una fuerza sostenida durante un tiempo largo produce más cambio en la cantidad de movimiento que la misma fuerza aplicada un lapso breve. De modo que tanto la fuerza como el intervalo de tiempo son importantes El tiempo es especialmente impor-para cambiar la cantidad de movimiento.

tante cuando cambias tu cantidad

de movimiento.

La cantidad fuerza 3 intervalo de tiempo se denomina ***impulso****. En notación abreviada, Impulso Ft*

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Cuál tiene más cantidad de movimiento: 1 automóvil de 1 ton que se mueve a 100 km/h o un camión de 2 ton que se mueve a 50 km/h?

2. ¿Un objeto en movimiento tiene impulso?

3. ¿Un objeto en movimiento tiene cantidad de movimiento?

4. Para la misma fuerza, ¿cuál cañón imparte mayor impulso a una bala de cañón: un cañón largo o uno corto?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Ambos tienen la misma cantidad de movimiento*

(1 ton 100 km/h 2 ton 50 km/h).

2. *No, el impulso no es algo que un objeto tenga, como la cantidad de movimiento. El impulso es lo que un objeto puede proporcionar o que puede experimentar cuando interactúa con algún otro objeto. Un objeto no puede poseer impulso tal como no puede poseer fuerza.*

3. *Sí, pero, al igual que con la velocidad, en un sentido relativo; esto es, con respecto a un marco de referencia, que por lo general es la superficie de la Tierra. La cantidad de movimiento que posee un objeto en movimiento con respecto a un punto estacionario sobre la Tierra puede ser muy diferente de la cantidad de movimiento que tiene con respecto a otro objeto en*

movimiento.

4. *El cañón largo imparte mayor impulso porque la fuerza actúa durante un tiempo más largo. (Un mayor impulso produce un mayor cambio en*

la cantidad de movimiento, de modo que un cañón largo imparte más

rapidez a una bala que un cañón corto.)

6.3 *El impulso cambia la cantidad de movimiento*

Cuanto mayor sea el impulso ejercido sobre algo, mayor será el cambio en su cantidad de movimiento. La relación exacta es:

Impulso cambio en cantidad de movimiento

Con frecuencia se usa el símbolo

Todos los términos en esta relación pueden expresarse en notación abreviada con el p para representar la cantidad de

símbolo delta Δ (una letra griega que se usa con frecuencia para denotar "cambio en"

movimiento.

o "diferencia en"):1

Ft (mv)

La ***relación impulso-cantidad de movimiento*** *ayuda a analizar muchos ejemplos en los que actúan fuerzas y cambia el movimiento. En ocasiones el impulso puede considerarse como la causa de un cambio en la cantidad de movimiento. A veces un cambio en la cantidad de movimiento puede considerarse como la causa de un impulso. No importa en qué forma lo pienses. Lo importante es que impulso y cambio en la cantidad de movimiento siempre están vinculados. Aquí se presentarán algunos ejemplos comunes en los que el impulso se relaciona con 1) aumento de la cantidad de movimiento, 2) disminución de la cantidad de movimiento durante un tiempo prolongado y 3) disminución de la cantidad de movimiento durante un tiempo breve.*

Caso 1: aumento de la cantidad de movimiento

Para aumentar la cantidad de movimiento de un objeto, tiene sentido aplicar la fuerza más grande posible durante el mayor tiempo posible. Para que un golfista dé su golpe de salida y un beisbolista trate de conectar un

cuadrangular, abanican lo más fuerte posible y continúan con su balanceo. Continuar con el balanceo extiende el tiempo de contacto.

Las fuerzas que intervienen en los impulsos por lo general varían de un instante a otro. Por ejemplo, un palo de golf que golpea una pelota ejerce fuerza cero sobre la bola hasta que ocurre el contacto; luego la fuerza aumenta rápidamente a medida que la bola se distorsiona (Figura 6.4). Luego la fuerza disminuye a medida que la bola adquiere rapidez y regresa a su forma original. De modo que, cuando se hable de tales fuerzas en este capítulo, se entenderá la fuerza promedio.

F I G U R A 6 . 4

1Para derivar esta relación, se reordena la segunda ley de Newton de modo que el factor tiempo sea más evidente.

La fuerza de impacto sobre una pelota

Si la fórmula para aceleración, a 5 F/m, se iguala con lo que se define como la aceleración, a 5 Δ v/Δ t, se obtiene de golf varía a lo largo de la duración del F/m 5 Δ v/Δ t. A partir de esto, se deriva FΔ t 5 Δ(mv). Si a Δ t se le denomina simplemente t, el intervalo de tiempo, impacto.

entonces Ft 5 Δ(mv).

94

PA R T E U N O

M EC Á N I C A

Caso 2: disminución de la cantidad de movimiento

durante un tiempo prolongado

Si estuvieras en un automóvil que está fuera de control y tuvieras que elegir entre golpear ***SCREENCAST: Cantidad***

una pared de concreto o una pila de paja, no tendrías que apelar a tu conocimiento de físi-de movimiento

ca para llegar a una decisión. El sentido común te dicta elegir la pila de paja. Pero conocer la física te ayuda a comprender por qué golpear un objeto suave es completamente diferente a golpear uno duro. En el caso de golpear o la pared o la paja y llegar a detenerse, el mismo impulso reduce tu cantidad de movimiento a cero. El mismo impulso no significa la misma cantidad de fuerza o la misma cantidad de tiempo; más bien significa el mismo ***VIDEO: Cambio en cantidad***

de movimiento-seguimiento

producto de fuerza y tiempo. Al golpear la pila de paja en lugar de la pared, extiendes el tiempo durante el cual tu cantidad de movimiento se reduce a cero. Un intervalo de tiempo más largo reduce la fuerza y disminuye la desaceleración resultante. Por ejemplo, si el intervalo de tiempo se extiende 100 veces, la fuerza se reduce a una milésima. Siempre que quieras que la fuerza sea pequeña, extiende el tiempo de contacto, de ahí que los tableros acolchados y las bolsas de aire salven vidas en los vehículos motorizados.

F I G U R A 6 . 5

Si el cambio en cantidad de movimiento

ocurre durante un tiempo prolongado,

la fuerza del golpe es pequeña.

F I G U R A 6 . 6

Si el cambio en cantidad de movi miento

ocurre durante un tiempo breve, la

fuerza del golpe es grande.

Cuando saltas desde una posición elevada hacia el suelo, ¿qué sucede si mantienes tus piernas rectas y rígidas? ¡Ay! En vez de el o, doblas tus rodil as cuando tus pies hacen contacto con el suelo. Al hacerlo, extiendes el tiempo durante el cual disminuye tu cantidad de movimiento de 10 a 20 veces el de un aterrizaje abrupto con las piernas rígidas. La fuerza resultante sobre tus huesos se reduce de 10 a 20 veces. Un luchador que se lanza al suelo trata de extender su tiempo de impacto con la lona al relajar sus músculos y extender el impacto en una serie de impactos más pequeños conforme su pie, rodil a, cadera, costil as y hombros sucesivamente golpean la lona. Desde luego, caer sobre una lona es preferible a caer sobre un suelo sólido porque la lona extiende el tiempo de frenado y, en consecuencia, reduce la fuerza de frenado.

La red de seguridad que usan los acróbatas de circo es un buen ejemplo de cómo lograr el impulso necesario para un aterrizaje seguro. La red de seguridad reduce la fuerza de frenado sobre un acróbata que cae porque aumenta en forma sustancial el tiempo de frenado. Si estás a punto de atrapar con la mano descubierta una rápida bola de béisbol, extiendes la mano hacia adelante a fin de tener mucho espacio para moverla hacia atrás después de hacer contacto con la pelota. Cuando extiendes el tiempo de contacto reduces la fuerza de la atrapada. De igual modo, un boxeador se mueve o rueda junto con el golpe para reducir la fuerza de contacto (Figura 6.8).

Caso 3: disminución de la cantidad de movimiento

durante un tiempo breve

F I G U R A 6 . 7

Un gran cambio en cantidad de movi-

Cuando boxeas, si te acercas al golpe en lugar de alejarte, estás en problemas porque el miento durante un tiempo largo requie-tiempo de contacto se reduce de modo que la fuerza aumenta. Lo mismo sucede si atra-re una fuerza promedio lo suficiente-

pas una pelota de béisbol que se mueve con gran rapidez mientras tu mano se acerca a la mente pequeña para que sea segura.

pelota en lugar de alejarse al contacto. O, cuando tu automóvil está fuera de control, si

C A PÍ T U LO 6 C A N T I DA D D E M OV I M I EN TO

95

(a)

(b)

F I G U R A 6 . 8

En ambos casos, el impulso proporcio-

nado por la mandíbula del boxeador

reduce la cantidad de movimiento del

golpe. (a) Cuando el boxeador se aleja

(se mueve junto con el golpe), extiende

el tiempo y disminuye la fuerza. (b)

Si el boxeador se mueve hacia el puño

enguantado, el tiempo se reduce y debe

soportar una fuerza más grande.

cambio en cantidad

cambio en cantidad

de movimiento

de movimiento

conduces hacia la pared de concreto en lugar de hacerlo hacia la pila de paja, realmente estás en problemas. En estos casos de tiempos de impacto cortos, las fuerzas de contacto son grandes. Recuerda que, para un objeto que se lleva al reposo, el impulso es el mismo sin importar cómo se detenga. Pero, si el tiempo es corto, la fuerza será grande.

La idea de tiempo de contacto corto explica cómo una experta en karate puede romper una pila de ladrillos con el golpe de su mano descubierta (Figura 6.9). Lleva el brazo y la mano rápidamente contra los ladrillos con una cantidad de movimiento considerable. Esta cantidad de movimiento se reduce rápidamente cuando asesta el impulso contra los ladrillos. El impulso es la fuerza de su mano contra los ladrillos multiplicada por el tiempo durante el cual su mano hace contacto con los ladrillos.

Mediante una ejecución rápida, hace que el tiempo de contacto sea muy breve y en correspondencia hace que la fuerza del impacto sea enorme. Si la mano rebota en el impacto, la fuerza es incluso mayor.

F I G U R A 6 . 9

Cassy imparte un gran impulso a los

P U N T O D E C O N T R O L

ladrillos en un tiempo breve y produce

una fuerza considerable.

1. Si el boxeador de la Figura 6.8 puede aumentar la duración del impacto tres veces más al moverse junto con el golpe, ¿en cuánto se reducirá la fuerza del impacto?

2. Si en vez de ello, el boxeador se mueve hacia el golpe, de modo que reduce la duración de impacto a la mitad, ¿en cuánto aumentará la fuerza del impacto?

Diferentes fuerzas ejercidas duran-

te diferentes intervalos de tiempo

3. Un boxeador que será golpeado intenta extender el tiempo para obtener mejo-pueden producir el mismo impulso:

res resultados, en tanto que un experto en karate asesta una fuerza en un Ft o Ft

tiempo corto para obtener mejores resultados. ¿No hay una contradicción aquí?

4. ¿Cuándo el impulso es igual a la cantidad de movimiento?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. La fuerza de impacto será sólo un tercio de lo que habría sido si no hubiera retrocedido.

2. La fuerza de impacto será dos veces mayor de lo que habría sido si hubiese mantenido la cabeza quieta. Los impactos de este tipo explican la mayoría VIDEO: Reducción de cantidad de

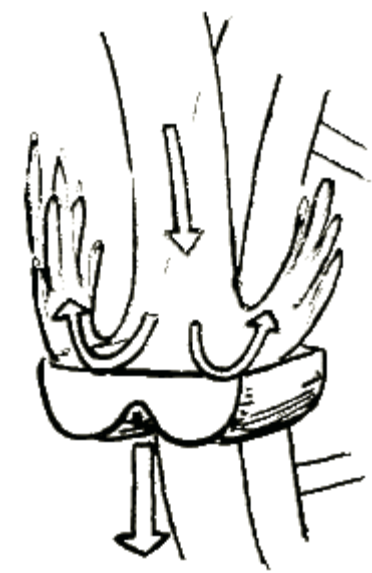
de los nocauts.

movimiento durante un tiempo breve

3. No hay contradicción porque los mejores resultados para cada uno son muy diferentes. El mejor resultado para el boxeador es reducir la fuerza, lo que se logra si aumenta al máximo el tiempo, y

el mejor resultado para el experto en karate es aumentar la fuerza suministrada en un tiempo mínimo.

4. Por lo general, el impulso es igual al cambio en la cantidad de movimiento. Si la cantidad de movimiento inicial de un objeto es cero cuando el impulso se aplica, entonces, cantidad de movimiento final = impulso aplicado. Y si un objeto se lleva al reposo, cantidad de movimiento inicial = impulso suministrado.



96

PA R T E U N O

M EC Á N I C A

6.4 Rebote

Si una maceta cae desde un anaquel sobre tu cabeza, puedes estar en problemas. Si re-Una maceta soltada sobre tu

cabeza rebota rápidamente. ¡Ay!

bota de tu cabeza, el problema sería mayor. ¿Por qué? Porque los impulsos son mayores Si el rebote tardara un tiempo más

cuando un objeto rebota. El impulso necesario para detener un objeto y luego "lanzarlo largo, como con una red de seguri-de vuelta" es mayor que el impulso necesario simplemente para llevar el objeto a un alto dad, entonces la fuerza del rebote

total. Supón, por ejemplo, que atrapas con las manos la maceta que cae. Proporcionas sería mucho menor.

un impulso para reducir su cantidad de movimiento a cero. Si lanzas la maceta arriba nuevamente, debes proporcionar impulso adicional. Esta mayor cantidad de impulso es la misma que el impulso que proporciona tu cabeza si la maceta rebota en ti.

Una de las fotografías que se incluyen al comienzo de este capítulo muestra al instructor de física Howie Brand balanceando un dardo contra un bloque de madera.

Si el dardo tiene un clavo en su nariz, se detiene cuando queda pegado al bloque. El bloque permanece de pie. Cuando se quita el clavo y la nariz del dardo es la mitad de una bola de caucho sólida, el dardo rebota al contacto con el bloque. El bloque cae. La fuerza contra el bloque es mayor cuando hay rebote.

El hecho de que los impulsos son mayores cuando hay rebote se aprovechó con gran éxito durante la fiebre del oro en California. En esa época se usaban ruedas de álabes ineficaces en las operaciones de minado. Lester A. Pelton empleó el concepto de rebote y diseñó un álabe curvo que hacía que el agua entrante rebotara al impacto. El rebote del agua aumentó enormemente el impulso sobre la rueda.

F I G U R A 6 . 1 0

Una rueda Pelton. Los álabes curvos

hacen que el agua rebote y dé una vuelta

en U, lo que produce un mayor impulso

para girar la rueda.

Impulso

P U N T O D E C O N T R O L

1. Con referencia a la Figura 6.9, ¿cuál es la diferencia entre la fuerza que Cassy ejerce sobre los ladrillos y la fuerza ejercida sobre su mano?

2. ¿Cómo difiere el impulso resultante del impacto si su mano rebota al golpear los ladrillos?

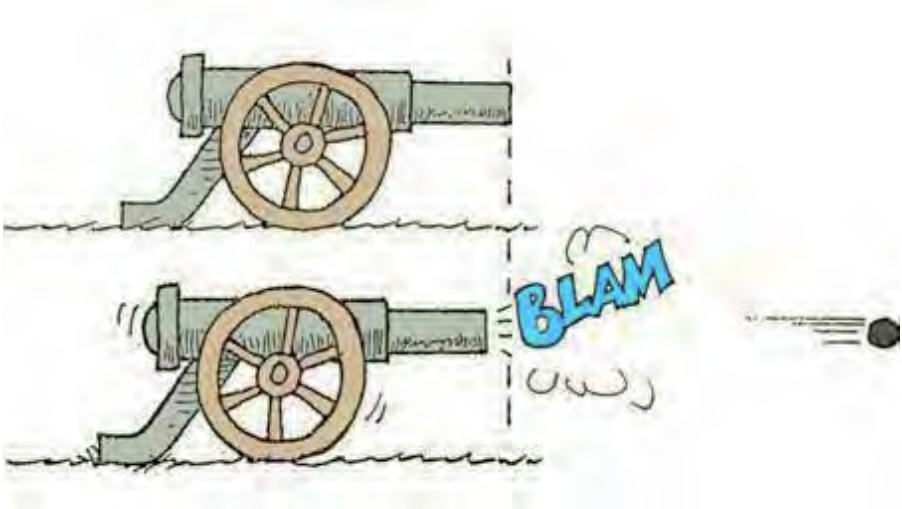
C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. De acuerdo con la tercera ley de Newton, las fuerzas son iguales. Sólo la resistencia de la mano humana y el entrenamiento que ha

recibido para poner la mano firme permiten la realización de esta hazaña sin romperse ningún hueso.

2. El impulso será mayor si su mano rebota de los ladrillos al momento del impacto. Si el tiempo de impacto no aumenta en correspondencia,

entonces se ejercerá una mayor fuerza sobre los ladrillos (¡y su mano!).



C A PÍ T U LO 6 C A N T I DA D D E M OV I M I EN TO

97

6.5 Conservación de la cantidad de movimiento

Por la segunda ley de Newton sabes que, para acelerar un objeto, debes aplicarle una fuerza neta. Este capítulo afirma en gran parte

lo mismo, pero con un lenguaje diferente.

La cantidad de movimiento se

Si quieres cambiar la cantidad de movimiento de un objeto, ejerce un impulso sobre él.

conserva en todas las colisiones,

elásticas e inelásticas (siempre que

Sólo un impulso externo a un sistema puede cambiar la cantidad de movimiento no interfieran fuerzas externas).

del sistema. Las fuerzas e impulsos internos no funcionan. Por ejemplo, las fuerzas moleculares dentro de una pelota de béisbol no tienen efecto sobre la cantidad de movimiento de la pelota, así como un empujón contra el tablero del automóvil en el que estás sentado no afecta la cantidad de movimiento del automóvil. Las fuerzas moleculares dentro de la pelota de béisbol y un empujón sobre el tablero son fuerzas internas.

Vienen en pares balanceados que se cancelan a cero dentro del objeto. Para cambiar la cantidad de movimiento de la pelota o el automóvil se necesita un empujón o un tirón externo. Si no hay una fuerza externa, entonces no hay impulso externo, y no es posible el cambio en la cantidad de movimiento.

Como otro ejemplo, considera el cañón que se dispara en la Figura 6.11. La fuer-SCREENCAST: Conservación de la

za sobre la bala de cañón en el interior del barril del cañón es igual y opuesta a la ***cantidad de movimiento***

fuerza que hace que el cañón recule. Dado que dichas fuerzas actúan durante el mismo tiempo, los impulsos también son iguales y opuestos. Recuerda la tercera ley de Newton acerca de las fuerzas de acción y reacción iguales y opuestas. También se aplica esto a los impulsos. Dichos impulsos son internos al sistema que comprende al cañón y a la bala de cañón, de modo que no cambian la cantidad de movimiento del sistema cañón-bala de cañón. Antes de disparar, el sistema está en reposo y la cantidad de movimiento es cero. Después de disparar, la cantidad de movimiento neta, o la cantidad de movimiento total todavía es cero. La cantidad de movimiento neta ni se gana ni se pierde.

F I G U R A 6 . 1 1

La cantidad de movimiento antes

En la Figura 6.11, la mayor parte

de disparar es cero. Después de

de la cantidad de movimiento de

disparar, la cantidad de movi-

la bala de cañón se debe a su rapi-

miento neta sigue siendo cero

dez; la mayor parte de la cantidad

porque la cantidad de movimien-

de movimiento del cañón que

to del cañón es igual y opuesta a

recula se debe a su masa. De modo

la cantidad de movimiento de la

que mv 5 mv.

bala de cañón.

La cantidad de movimiento, como las cantidades de velocidad y fuerza, tiene tanto dirección como magnitud. Es una cantidad vectorial. Al igual que la velocidad y la fuerza, la cantidad de movimiento puede cancelarse. De modo que, aunque la bala de cañón en el ejemplo anterior adquiere cantidad de movimiento cuando se dispara y el cañón que recula gana cantidad de movimiento en la dirección opuesta, no hay ganancia en el sistema cañón-bala de cañón. Las cantidades de movimiento de la bala de cañón y del cañón son iguales en magnitud y opuestas en dirección.2 Por tanto, como vectores, suman cero para el sistema en su conjunto. Dado que no actúa ninguna fuerza externa neta sobre el sistema, no hay impulso neto sobre el sistema y no hay cambio neto en la cantidad de movimiento. Puedes ver que, si no actúa una fuerza neta o un impulso neto sobre un sistema, la cantidad de movimiento de dicho sistema no puede cambiar.

2Aquí se desprecia la cantidad de movimiento de los gases expulsados de la pólvora que explota, la cual puede ser considerable. Disparar un arma con salvas a corta distancia definitivamente no debe hacerse debido a la

considerable cantidad de movimiento de los gases expulsados. Más de una persona ha muerto por disparos de salvas a corta distancia. En 1998, un ministro en Jacksonville, Florida, le puso dramatismo a su sermón ante varios cientos de feligreses, incluida su familia, y se disparó en la cabeza con una salva de una Magnum calibre 0.357. Aunque no salió la bala del arma, sí salieron gases y fueron suficientes para ser mortales. De modo que, hablando de manera estricta, la cantidad de movimiento de la bala + la cantidad de movimiento de los gases expulsados es igual a la cantidad de movimiento opuesta del arma que recula.

F I G U R A 6 . 1 2

Una bola blanca golpea una bola 8

frontalmente. Considera este evento

en tres sistemas: (a) Una fuerza externa

actúa sobre el sistema de la bola 8 y

su cantidad de movimiento aumenta.

Sistema de la bola 8

Sistema de la bola blanca

Sistema bola blanca + bola 8

(b) Una fuerza externa actúa sobre el

sistema de la bola blanca y su cantidad

Cuando la cantidad de movimiento, o cualquier cantidad en física, no cambia, se de movimiento disminuye. (c) Ninguna

fuerza externa actúa sobre el sistema

dice que se conserva. La idea de que la cantidad de movimiento se conserva cuando bola blanca 1 bola 8, y la cantidad de

no actúan fuerzas externas se eleva a una ley central de la mecánica, llamada ***ley de*** *movimiento se conserva (simplemente*

conservación de la cantidad de movimiento*, que afirma que:*

se transfiere de una parte del sistema a

la otra).

En ausencia de una fuerza externa, la cantidad de movimiento de un sistema permanece invariable.

En cualquier sistema en el que todas las fuerzas sean internas (como, por ejemplo, automóviles que chocan, núcleos atómicos que experimentan decaimiento radiactivo o estrellas que explotan) la cantidad de movimiento neta del sistema antes y después del evento es la misma.

P U N T O D E C O N T R O L

1. La segunda ley de Newton afirma que, si no se ejerce fuerza neta sobre un sistema, no ocurre aceleración. ¿Eso significa que no ocurre ningún cambio en la cantidad de movimiento?

2. La tercera ley de Newton afirma que la fuerza que un cañón ejerce sobre una bala de cañón es igual y opuesta a la fuerza que la bala ejerce sobre el cañón. Entonces, ¿el impulso que el cañón ejerce sobre la bala es igual y opuesta al impulso que la bala ejerce sobre el cañón?

¿Puedes ver cómo las leyes de

Newton se relacionan con la

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

conservación de la cantidad de

1. *Sí, porque el que no haya aceleración significa que no ocurre cambio en movimiento?*

la velocidad o en la cantidad de movimiento (masa 3 velocidad). Otra

línea de razonamiento es simplemente que la ausencia de una fuerza neta significa que no hay un impulso neto y, por tanto, no hay un cambio en la cantidad de movimiento.

2. *Sí, porque la interacción entre ambos ocurre durante el mismo intervalo de tiempo. Dado que los tiempos son iguales y las fuerzas son iguales y opuestas, los impulsos Ft también son iguales y opuestos. El impulso es una cantidad vectorial y puede cancelarse.*

LEYES DE CONSERVACIÓN

Una ley de conservación especifica que ciertas cantidades angular se conserva: cualquiera que sea el movimiento rotacional de un sistema permanecen precisamente constantes, sin

de un sistema planetario, su cantidad de movimiento angular

importar qué cambios ocurran en el interior del sistema.

permanece invariable en tanto esté libre de influencias externas.

Es una ley de constancia durante el cambio. En este capítulo se

En el Capítulo 22 aprenderás que la carga eléctrica se conserva, lo

observa que la cantidad de movimiento total es invariable durante

que significa que no puede crearse ni destruirse. Cuando estudies

las colisiones en tanto no actúe una fuerza externa durante la

física nuclear, verás que ésta y otras leyes de conservación gobiernan colisión. Se dice que la cantidad de movimiento se conserva. En

el mundo submicroscópico. Las leyes de conservación son una

el siguiente capítulo aprenderás que la energía se conserva cuando

fuente de profunda comprensión de la sencilla regularidad de

se transforma; la cantidad de energía en la luz, por ejemplo, se

la naturaleza y con frecuencia se consideran las leyes físicas más

transforma por completo en energía térmica cuando la luz se

fundamentales. ¿Puedes pensar en cosas de tu propia vida que

absorbe. En el Capítulo 8 verás que la cantidad de movimiento

permanezcan constantes mientras otras cambian?

6.6 *Colisiones*

La cantidad de movimiento se conserva en las colisiones; esto es: la cantidad de movimiento neta de un sistema de objetos en colisión no cambia antes, durante o después de la colisión. Esto se debe a que las fuerzas que actúan durante la colisión son fuerzas internas: fuerzas que actúan y reaccionan en el interior del sistema. Sólo se redistribuye o se comparte cualquier cantidad de movimiento que exista antes de la colisión. En cualquier colisión se puede decir:

Cantidad de movimiento** 5 **cantidad de movimiento

neta antes de la colisión

neta después de la colisión

Esto es cierto sin importar cómo se muevan los objetos antes de chocar.

Cuando una bola de bil ar en movimiento choca de frente con

otra bola de bil ar en reposo, la bola en movimiento llega al reposo

y la otra bola se aleja con la rapidez de la bola que choca. A esto se le denomina ***colisión elástica****; en condiciones ideales, los objetos que (a)*

(b)

chocan rebotan sin deformación duradera o la generación de calor (Fi-

gura 6.13). Pero la cantidad de movimiento se conserva aun cuando

los objetos en colisión queden unidos durante la colisión. Ésta es una ***colisión inelástica****, que se caracteriza por la deformación o por la generación de calor o ambas. En una colisión perfectamente inelástica,*

ambos objetos quedan unidos. Piensa, por ejemplo, en el caso de un

(c)

vagón de carga que se mueve sobre una vía y choca con otro vagón

de carga en reposo (Figura 6.14). Si los vagones tienen igual masa y

quedan acoplados por la colisión, ¿puedes predecir la velocidad de los vagones acoplados ***F I G U R A 6 .1 3***

después del impacto?

Colisiones elásticas de bolas igualmente

Supón que un solo vagón se mueve a 10 metros por segundo (m/s) y que la masa de masivas. (a) Una bola verde golpea una bola amaril a en reposo. (b) Una colisión

cada vagón es m. Entonces, de acuerdo con la conservación de la cantidad de movimiento, frontal. (c) Una colisión de bolas que se (mv neta) (mv neta)

mueven en la misma dirección. En cada

antes

después

caso, la cantidad de movimiento se trans-

(m 10) (2 m V)

fiere de una bola a la otra.

antes

después

Por simple álgebra, V 5 m / s. Esto tiene sentido porque, dado que el doble de masa se mueve después de la colisión, la velocidad debe ser la mitad de la velocidad antes de la colisión. Entonces, ambos lados de la ecuación son iguales.

Observa las colisiones inelásticas que se muestran en la Figura 6.15. Si A y B se mueven con iguales cantidades de movimiento en direcciones opuestas (A y B chocan de frente), entonces una de ellas se considera negativa y las cantidades de movimiento suman algebraicamente cero. Después de la colisión, los restos acoplados permanecen en el punto de impacto, con cantidad de movimiento cero. Si, por otra parte, A y B se mueven en la misma dirección (A queda unido a B), la cantidad de movimiento neta es simplemente la suma de sus cantidades de movimiento individuales.

Sin embargo, si A se mueve hacia el este con, por decir, 10 unidades más de cantidad de movimiento que B, que se mueve hacia el oeste (no se muestra en la Figura 6.15), entonces, después de la colisión, los restos acoplados se mueven hacia el este con 10 unidades de $v = 10$

$v = 0$

$v = 5$

F I G U R A 6 . 1 4

Colisión inelástica. La cantidad de movimiento del vagón de carga de la izquierda se comparte con el vagón de carga de igual masa a la derecha después de la colisión.

F I G U R A 6 . 1 5

Colisiones inelásticas. La cantidad de

A

B

A

B

movimiento neta de los camiones antes

y después de la colisión es la misma.

A

B

A

B

A

B

A

B

cantidad de movimiento. Desde luego, los restos finalmente llegarán al reposo debido a la fuerza de fricción externa del suelo. No obstante, el tiempo de impacto es corto y la fuerza de impacto de la colisión es mucho mayor que la fuerza de fricción externa, de modo que, para fines prácticos, la cantidad de movimiento inmediatamente antes y después de Galileo trabajó mucho para produ-la colisión se conserva. La cantidad de movimiento neta justo antes de que los camiones cir superficies lisas que redujeran

al mínimo la fricción. ¡Le habría

choquen (10 unidades) es igual a la cantidad de movimiento combinada de los camio-encantado experimentar con las

nes estropeados justo después del impacto (10 unidades). El mismo principio se aplica a pistas de aire actuales!

naves espaciales que se acoplan suavemente, donde la fricción está ausente por completo.

Su cantidad de movimiento neta justo antes de acoplarse se conserva y es igual a su cantidad de movimiento neta justo después de acoplarse.

F I G U R A 6 . 1 6

Will Maynez demuestra su pista de

aire. Chorros de aire provenientes de

pequeños orificios proporcionan una

superficie sin fricción para que los carros

se deslicen sobre ella.

P U N T O D E C O N T R O L

Considera la pista de aire de la Figura 6.16. Supón que un carro deslizador, con una masa de 0.5 kg, choca con un carro estacionario que tiene una masa de 1.5 kg y se queda pegado. Si la rapidez del carro deslizador antes de la colisión es v

, ¿cuán rápido se deslizarán los carros acoplados después de la colisión?

antes

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

De acuerdo con la conservación de la cantidad de movimiento, la cantidad de movimiento del carro de 0.5 kg antes de la colisión 5 cantidad de movimiento de ambos carros pegados después de la colisión:

.

(0 5 kg) v antes = .

(0 5 kg + .

1 5 kg) v después

.

(0 5 kg) v

.

0 5 v

v

v

antes

antes

antes

después =

=

=

.

(0 5 + 1.) kg

2

4

Esto tiene sentido porque, después de la colisión, se moverá cuatro veces más masa, de modo que los carros acoplados se deslizarán a 1/4 de rapidez.

Para un ejemplo numérico de conservación de la cantidad de movimiento, piensa en un pez que nada hacia un pez más pequeño en reposo y se lo traga (Figura 6.17). Si el pez más grande tiene una masa de 5 kg y nada a 1 m/s hacia un pez de 1 kg, ¿cuál es la velocidad del pez más grande inmediatamente después de almorzar? Desprecia los efectos de la resistencia del agua.

F I G U R A 6 . 1 7

Dos peces constituyen un sistema, que

tiene la misma cantidad de movimiento

justo antes del almuerzo y justo después

del almuerzo.

Para responder esta pregunta puedes usar conservación de cantidad de movimiento: ***SCREENCAST: Problema de la***

cantidad de movimiento del pez

Cantidad de movimiento = Cantidad de movimiento

que almuerza

neta antes del almuerzo neta después del almuerzo

$(5\ kg)\ 1(\ m/s) + 1(\ kg)(0\ m/s) = (5\ kg + 1\ kg)\ v$

$5\ kg{\cdot}m/s = (6\ kg)\ v$

$v = 5/6\ m/s$

SCREENCAST: Problema de la

cantidad de movimiento

Puedes ver que el pez pequeño no tiene cantidad de movimiento antes de almorzar ***del sapo Fred***

porque su velocidad es cero. Después de almorzar, la masa combinada de ambos peces se mueve con velocidad v, que, por simple álgebra, se ve que es 5/6 m/s. Esta velocidad está en la misma dirección que la del pez más grande.

Supón que el pez pequeño de este ejemplo no está en reposo, sino que nada hacia la izquierda con una velocidad de 4 m/s. Nada en una dirección opuesta a la del pez más grande: una dirección negativa, si la dirección del pez más grande se considera positiva.

En este caso:

Cantidad de movimiento = Cantidad de movimiento

neta antes del almuerzo neta después del almuerzo

$(5\ kg)\ 1(\ m/s) + 1(\ kg)(\ 4$

$-\ m/s) = (5\ kg + 1\ kg)\ v$

$(5\ kg{\cdot}m/s) - (4\ kg{\cdot}m/s) = (6\ kg)\ v$

$1\ kg{\cdot}m/s = 6\ kg\ v$

$v = 1/6\ m/s$

Observa que la cantidad de movimiento negativa del pez más pequeño antes de almorzar efectivamente hace más lento al pez más grande después de almorzar. Si el pez más pequeño nadara el doble de rápido, entonces

Cantidad de movimiento = Cantidad de movimiento

neta antes del almuerzo neta después del almuerzo

(5 kg) 1(m/s) + 1(kg)(8

− m/s) = (5 kg + 1 kg) v

(5 kg•m/s) − (8 kg•m/s) = (6 kg) v

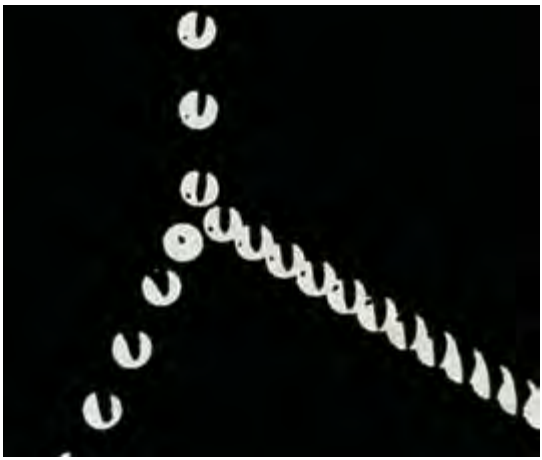
3

− kg•m/s = 6 kg v

v = 1/

− 2m/s

Aquí se observa que la velocidad final es –1/2 m/s. ¿Cuál es el significado del signo menos? Significa que la velocidad final es opuesta a la velocidad inicial del pez más grande. Después de almorzar, el sistema de dos peces se mueve hacia la izquierda. Se deja como problema de final de capítulo el encontrar la velocidad inicial del pez más pequeño que detendría al pez más grande en su camino.



6.7 *Colisiones más complicadas*

La cantidad de movimiento neta permanece invariable en cualquier colisión, sin importar el ángulo entre las trayectorias de los objetos en colisión. Cuando se involucran diferentes direcciones, la cantidad de movimiento neta puede expresarse con la regla del paralelo-A diferencia de las bolas de billar

gramo de suma de vectores. Aquí no se abordarán con mucho detal e tales casos com-después de una colisión, las partí-

plicados, pero se mostrarán algunos ejemplos sencil os para dar a entender el concepto.

culas nucleares no experimentan

arrastre aerodinámico u otra

En la Figura 6.18 se observa una colisión entre dos automóviles que viajan en fricción. Si no se desvían mediante

ángulos rectos uno con respecto al otro. El automóvil A tiene una cantidad de movi-fuerzas eléctricas o magnéticas,

miento dirigida hacia el este, y la cantidad de movimiento del automóvil B se dirige vuelan en líneas rectas sin perder

hacia el norte. Si sus cantidades de movimiento individuales son iguales en magni-rapidez hasta golpear a otra

tud, entonces su cantidad de movimiento combinada está en una dirección hacia partícula o experimentar un decaimiento radiactivo.

el noreste. Ésta es la dirección en la que viajarán los automóviles acoplados después de la colisión. Se observa que, tal como la diagonal de un cuadrado no es igual a la suma de dos de los lados, la magnitud de la cantidad de movimiento resultante no será simplemente igual a la suma aritmética de las dos cantidades de movimiento antes de la colisión. Recuerda la relación entre la diagonal de un cuadrado y la longitud de uno de sus lados (Figura 2.9 en el Capítulo 2): la diagonal es V2 veces la longitud del lado de un cuadrado. De modo que, en este ejemplo, la magnitud de la cantidad de movimiento resultante será igual a V2 veces la cantidad de movimiento de cualquier vehículo.

F I G U R A 6 . 1 8

La cantidad de movimiento es una

N

N

cantidad vectorial.

Cantidad de

Cantidad de movimiento

Cantidad de movimiento

movimiento

combinada de A + B

automóvil A +

automóvil B

(a)

(b)

F I G U R A 6 . 1 9

A

La cantidad de movimiento se conser-

A

va en las bolas de billar que chocan y

en partículas nucleares que chocan en

A

una cámara de burbujas de hidrógeno

B

A

D

líquido. (a) La bola de billar A golpea

A

B

a la bola de billar B, que inicialmente

B

C

estaba en reposo. (b) El protón A choca

A

sucesivamente con los protones B, C y

B

D. Los protones en movimiento dejan

B

trazas de pequeñas burbujas.

C A PÍ T U LO 6 R E V ISI Ó N

FIGURA 6.20

La Figura 6.20 muestra un petardo que cae y ex-
Después de la explosión del petardo,
plota en dos pedazos. Las cantidades de movimien-
las cantidades de movimiento de sus
to de los fragmentos se combinan mediante suma
fragmentos se suman (mediante suma
vectorial para igualar la cantidad de movimiento
vectorial) para producir la cantidad de
original del petardo que cae. La Figura 6.19b ex-
movimiento original.
tiende esta idea al reino microscópico, donde las
trazas de partículas subatómicas se revelan en una
cámara de burbujas de hidrógeno líquido.
Cualquiera que sea la naturaleza de una colisión
o cuán complicada sea, la cantidad de movimiento
total antes, durante y después permanece invaria-
ble. Esta ley extremadamente útil permite aprender
mucho de las colisiones sin conocimiento alguno
de las fuerzas que actúan en una colisión. En el
siguiente capítulo verás que la energía, acaso en
mv
múltiples formas, también se conserva. Si aplicas la

conservación de cantidad de movimiento y de ener-

gía a las colisiones de partículas subatómicas como

se observan en varias cámaras de detección, pue-

des calcular las masas de estas pequeñas partículas.

mv

Esta información se obtiene al determinar las can-

tidades de movimiento y la energía antes y después

de las colisiones.

La conservación de la cantidad de movimiento

y la conservación de la energía (que se estudiará

en el siguiente capítulo) son las dos herramientas más poderosas de la mecánica.

Su aplicación produce información detallada que va desde hechos acerca de las interacciones de partículas subatómicas hasta la estructura y el movimiento de galaxias enteras.

-

R E S U M E N D E T É R M I N O S *(C O N O C I M I E N T O)*
Cantidad de movimiento. *Producto de la masa de un objeto y*

movimiento de un sistema permanece invariable. Por

su velocidad.

tanto, la cantidad de movimiento antes de un evento que

Impulso. *El producto de la fuerza que actúa sobre un objeto y sólo involucra fuerzas internas es igual a la cantidad de*

el tiempo durante el cual ésta actúa.

movimiento después del evento:

Relación impulso-cantidad de movimiento. *El impulso es*

mv

mv

(antes del evento)

(después del evento)

igual al cambio en la cantidad de movimiento del objeto

Colisión elástica. *Colisión en la que los objetos rebotan sin sobre el que actúa el impulso. En notación simbólica,*

deformación duradera o generación de calor.

Ft Δ mv

Colisión inelástica. *Colisión en la que los objetos se*

Ley de conservación de la cantidad de movimiento. *En*

distorsionan, generan calor y posiblemente quedan unidos.

ausencia de una fuerza externa, la cantidad de

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S *(C O M P R E N S I Ó N)*
6.1 Cantidad de movimiento

6.3 El impulso cambia la cantidad de movimiento

1. ¿Cuál tiene mayor cantidad de movimiento: un pesado

5. ¿Cómo es que la relación impulso-cantidad de

camión en reposo o una patineta en movimiento?

movimiento se relaciona con la segunda ley de Newton?

6.2 Impulso

6. Para impartir el mayor impulso a un objeto, ¿debes ejercer

la mayor fuerza posible, extender dicha fuerza durante el

2. Distingue entre fuerza e impulso.

mayor tiempo posible, o ambos? Explica.

3. ¿Cuáles son las dos formas para aumentar el impulso?

7. Cuando te golpea un objeto en movimiento, ¿es favorable

4. Para la misma fuerza, ¿por qué un cañón largo imparte

que el objeto haga contacto contigo durante un tiempo

más rapidez a una bala que un cañón corto?

breve o durante un tiempo largo? Explica.

104

PA R T E U N O

M EC Á N I C A

8. En karate, ¿por qué es más efectiva una fuerza que se

¿La cantidad de movimiento se conservaría para el

aplica durante un tiempo breve?

sistema si la cantidad de movimiento no fuese una

9. En boxeo, ¿por qué es conveniente moverse en el mismo

cantidad vectorial? Explica.

sentido del golpe?

6.6 Colisiones

6.4 Rebote

16. ¿En cuál se conserva la cantidad de movimiento: en una

10. ¿Cuál experimenta mayor cambio en la cantidad de

colisión elástica o en una colisión inelástica?

movimiento: a) una pelota de béisbol que es atrapada, b) una

17. El vagón de ferrocarril A rueda con cierta rapidez y

pelota de béisbol que se lanza o c) una pelota de béisbol que

realiza una colisión perfectamente elástica con el vagón B

es atrapada y luego lanzada de vuelta, si todas las pelotas

de la misma masa. Después de la colisión, se observa que

tienen la misma rapidez justo antes de ser atrapadas y justo

el vagón A está en reposo. ¿Cómo se compara la rapidez

después de ser lanzadas?

final del vagón B con la rapidez inicial del vagón A?

11. En la pregunta anterior, ¿cuál caso requiere el mayor impulso?

18. Si los vagones igualmente masivos de la pregunta anterior

6.5 Conservación de la cantidad de movimiento

quedan unidos después de chocar inelásticamente, ¿cuál

12. ¿Puedes producir un impulso neto sobre un automóvil si

es la diferencia entre su rapidez después de la colisión y la

te sientas en su interior y empujas sobre el tablero? ¿Las

rapidez inicial del vagón A?

fuerzas internas dentro de un balón de soccer pueden

6.7 Colisiones más complicadas

producir un impulso sobre el balón que cambie su

19. Supón que una bola de masil a, que se mueve de forma

cantidad de movimiento?

horizontal con 1 kg m/s de cantidad de movimiento, choca

13. ¿Es correcto decir que, si no se ejerce impulso neto sobre

y queda unida a una bola de masil a idéntica que se mueve

un sistema, entonces no ocurrirá cambio en la cantidad

verticalmente con 1 kg m/s de cantidad de movimiento.

de movimiento del sistema?

¿Cuál es la magnitud de su cantidad de movimiento

14. ¿Qué significa decir que la cantidad de movimiento

combinada?

(o cualquier cantidad) se conserva?

20. En la pregunta anterior, ¿cuál es la cantidad de

15. Cuando una bala de cañón se dispara, la cantidad de

movimiento total de las bolas de masilla antes y después

movimiento se conserva para el sistema cañón + bala.

de la colisión?

P I E N S A Y R E A L I Z A *(A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 21. Cuando estés un poco adelantado en tus estudios, falta a*

movimiento como su conservación cuando no se imparte

clases alguna tarde y visita tu salón de billar local y ponte

derrape rotacional ("english") a la bola blanca. Cuando

al día en la conservación de la cantidad de movimiento.

se aplica efecto al golpear la bola blanca fuera del centro,

Observa que, sin importar cuán complicadas sean las

la cantidad de movimiento rotacional, que también

colisiones de las bolas, la cantidad de movimiento a

se conserva, complica un poco el análisis. Pero, sin

lo largo de la línea de acción de la bola blanca antes del

importar cómo se golpee la bola

impacto es la misma que la cantidad de movimiento

blanca, siempre se conservará la

combinada de todas las bolas a lo largo de esta dirección

cantidad de movimiento, tanto

después del impacto, y que los componentes de la

lineal como rotacional. Tanto

cantidad de movimiento perpendiculares a esta línea de

el pool como el billar ofrecen

acción se cancelan en cero después del impacto, el mismo

demostraciones excelentes de la

valor que antes del impacto en esta dirección. Verás más

conservación de la cantidad de

claramente tanto la naturaleza vectorial de la cantidad de

movimiento en acción.

S U S T I T U Y E Y L I S T O *(F A M I L I A R I Z A C I Ó N C O N E C U A C I O N E S)* ***Cantidad de movimiento*** *5* ***mv***

Impulso *5* ***cambio en la cantidad de movimiento: Ft*** *5* ***mv***

22. ¿Cuál es la cantidad de movimiento de una bola de

26. ¿Cuál es el impulso sobre una bola de 8 kg que rueda a

boliche de 8 kg que rueda a 2 m/s?

2 m/s cuando choca con una almohada y se detiene?

23. ¿Cuál es la cantidad de movimiento de una caja de 50 kg

27. ¿Cuánto impulso detiene una caja de 50 kg que se desliza

que se desliza a 4 m/s por una superficie de hielo?

a 4 m/s cuando encuentra una superficie rugosa?

Impulso *5* ***Ft***

Conservación de cantidad de movimiento: mv

*5 **mv***

antes

después

24. ¿Qué impulso ocurre cuando una fuerza promedio de

28. Una bola de masil a de 2 kg, que se mueve a 3 m/s,

10 N se ejerce sobre un carro durante 2.5 s?

choca con una bola de masil a de 2 kg en reposo.

25. ¿Qué impulso ocurre cuando la misma fuerza de 10 N

Demuestra que la rapidez de las dos bolas de masil a unidas,

actúa sobre el carro durante el doble de tiempo?

inmediatamente después de la colisión, es de 1.5 m/s.

C A PÍ T U LO 6 R E V ISI Ó N

105

***P I E N S A Y R E S U E L V E** (A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 29. Barry, el jugador de bolos, se pregunta cuánto impulso es*

almuerzo. Demuestra que la rapidez del pez más pequeño

necesario para detener una bola de boliche de 10 kg que

que se aproxima, antes del almuerzo, debió ser de 5 m/s.

se mueve a 6 m/s. ¿Cuál es tu respuesta?

30. Joanne conduce su automóvil, con una masa de 1,000 kg,

a una rapidez de 20 m/s. Demuestra que, para llevar su

automóvil a alto total en 10 s, la fricción del camino debe

ejercer una fuerza de 2,000 N sobre el automóvil.

31. Un automóvil, que lleva un maniquí de ensayo de 75 kg,

choca con una pared a 25 m/s y llega al reposo en 0.1 s.

Demuestra que la fuerza promedio ejercida por el cinturón de seguridad sobre el maniquí es 18,750 N.

36. El superhéroe de las tiras cómicas encuentra un asteroide en el espacio exterior y lo lanza violentamente a 800 m/s, tan rápido como una bala. El asteroide es mil veces más masivo que el superhéroe. En la tira cómica, el superhéroe se ve en reposo después del lanzamiento. Si tienes en cuenta la física, ¿cuál sería su velocidad de retroceso?

32. Betty (masa: 40 kg), que está de pie sobre hielo resbaladizo, atrapa a su perro que salta (masa: 15 kg) y que se mueve horizontalmente a 3.0 m/s. Demuestra que la rapidez de Betty y su perro después de atraparlo es de aproximadamente 0.8 m/s.

33. Una bola de masilla de 2 kg que se mueve hacia la derecha tiene una colisión inelástica frontal con una bola de masilla de 1 kg que se mueve hacia la izquierda. Si la masa combinada no se mueve justo después de la colisión, ¿qué puedes concluir acerca de las rapideces relativas de las bolas antes de la colisión?

37. Dos automóviles, cada uno con 1,000 kg de masa, se mueven con la misma rapidez, 20 m/s, cuando chocan y quedan unidos. ¿En qué dirección y con qué rapidez se mueven los restos a) si un automóvil se conducía hacia el norte y uno al sur, y b) si un automóvil se conducía al

norte y uno al este (como se muestra en la Figura 6.18)?

34. Un motor diesel de ferrocarril pesa cuatro veces más que

38. Un huevo de avestruz de masa m se lanza con una rapidez

un vagón de carga. Si el motor diesel se mueve a 5 km/h

v hacia una sábana pandeada y llega al reposo en un

hacia un vagón de carga que inicialmente está en reposo,

tiempo t.

demuestra que la rapidez del motor y el vagón acoplados

a. Demuestra que la fuerza que actúa sobre el huevo

es de 4 km/h.

cuando golpea la sábana es mv/t.

35. Un pez de 5 kg, que nada a 1 m/s, traga un distraído pez

b. Si la masa del huevo es 1 kg, su rapidez inicial es 2 m/s

de 1 kg que nada hacia él con una rapidez que lleva a

y el tiempo para detenerse es 0.2 s, demuestra que la

ambos peces a un alto total inmediatamente después del

fuerza promedio sobre el huevo es 10 N.

P I E N S A Y C L A S I F I C A *(A N Á L I S I S)*

39. Las bolas que se muestran tienen diferentes masas y

4 m/s

6 m/s

rapideces. Clasifica lo siguiente de mayor a menor:

2.0 m/s

9.0 m/s

8.5 m/s

12.0 m/s

A

B

1.0 kg

1.2 kg

0.8 kg

5.0 kg

8 m/s

10 m/s

A

B

C

D

4 m/s

6 m/s

a. Las cantidades de movimiento.

b. Los impulsos necesarios para detener las bolas.

C

D

40. Trotador Jake corre a lo largo de la plataforma de un ferrocarril que se mueve con las velocidades mostradas. En cada caso, la velocidad de Jake está dada en relación

6 m/s

18 m/s

con la plataforma. Llama positiva la dirección hacia la

derecha. Clasifica los siguientes de mayor a menor:

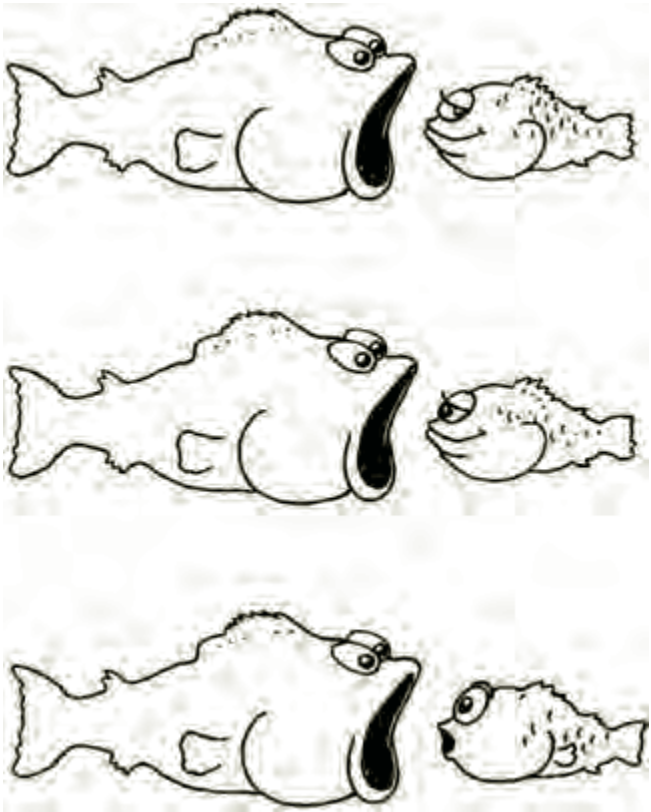
b.

Las cantidades de movimiento de Jake en relación con

a. La magnitud de las cantidades de movimiento de Jake

un observador estacionario sobre el suelo.

en relación con la plataforma.



41. Marshall empuja cajas desde el reposo por el piso de su

tiene una masa cinco veces la masa del pez pequeño.

salón de clase durante 3 s, con una fuerza neta como se

Inmediatamente después de almorzar, clasifica de mayor a

muestra. Por cada caja, clasifica lo siguiente de mayor a

menor las rapideces del pez que antes estaba hambriento.

menor:

$v = 4\ m/s$

100 N

75 N

50 N

$v = 0$

30 kg

20 kg

10 kg

A

A

B

C

$v = 4\ m/s$

a. Impulso suministrado

$v = 1\ m/s$

b. Cambios en la cantidad de movimiento

B

c. Rapideces finales

d. Cantidades de movimiento en 3 s

42. Un pez hambriento está a punto de almorzar con las

$v = 5\ m/s$

rapideces mostradas. Supón que el pez hambriento

$v = 2\ m/s$

C

***P I E N S A Y E X P L I C A** (S Í N T E S I S)*

43. Cuando un supertanque se lleva al alto, sus motores por lo

54. En términos de impulso y cantidad de movimiento,

general se apagan aproximadamente a 25 km del puerto.

¿por qué es importante que las aspas de los helicópteros

¿Por qué es tan difícil detener o girar un supertanque?

desvíen el aire hacia abajo?

44. En términos de impulso y de cantidad de movimiento,

55. Un vehículo lunar se pone a prueba sobre la Tierra con una

¿por qué los tableros acolchados hacen más seguros a los

rapidez de 10 km/h. Cuando viaja igual de rápido en la Luna,

automóviles?

¿su cantidad de movimiento es mayor, menor o la misma?

45. En términos de impulso y cantidad de movimiento, ¿por

56. No puedes lanzar un huevo crudo contra una pared sin

qué las bolsas de aire en los automóviles reducen el riesgo

romperlo. Pero Peter Hopkinson puede lanzar un huevo

de lesión en los accidentes?

con la misma rapidez hacia una sábana pandeada sin

46. ¿Por qué los gimnastas usan colchonetas de piso que son

romperlo. Explica con los conceptos de este capítulo.

muy gruesas?

47. En términos de impulso y cantidad de movimiento, ¿por

qué los montañistas prefieren las sogas de nailon, que se

estiran mucho bajo tensión?

48. ¿Por qué sería un error peligroso el que un saltador de bungee use un cable de acero en lugar de una cuerda elástica?

49. Cuando saltas desde una altura significativa, ¿por qué es

conveniente aterrizar con las rodillas un poco dobladas?

50. Una persona puede sobrevivir a un impacto con los pies

por delante a rapideces de aproximadamente 12 m/s

(27 mi/h) en concreto, 15 m/s (34 mi/h) en tierra, y 34

57. ¿Por qué es difícil que un bombero sostenga una manguera

m/s (76 mi/h) en agua. ¿Cuál es la razón por la que hay

que arroja grandes cantidades de agua a gran rapidez?

diferentes valores para distintas superficies?

58. ¿Estarías a salvo si dispararas un arma que tuviera una

51. Cuando atrapas una rápida bola de béisbol con la mano

bala 10 veces más masiva que el arma? Explica.

descubierta, ¿por qué es importante extender la mano

59. ¿Por qué los impulsos que ejercen mutuamente los objetos

hacia adelante para atraparla?

que chocan son iguales y opuestos?

52. ¿Por qué sería una mala idea tener el dorso de la mano

60. Si una bola se proyecta hacia arriba desde el suelo con

contra la pared del jardín cuando atrapas una bola en un

10 kg·m/s de cantidad de movimiento, ¿cuál es la cantidad

largo elevado?

de retroceso de la Tierra? ¿Por qué no se siente esto?

53. Hace muchos años los automóviles se fabricaban para

61. Cuando una manzana cae de un árbol y golpea el suelo

que fueran lo más rígido posible, mientras que los

sin rebotar, ¿qué pasa con su cantidad de movimiento?

automóviles de hoy están diseñados para arrugarse al

impacto. ¿Por qué?

62. ¿Por qué la manopla de un receptor de béisbol tiene más

acolchonado que un guante convencional?

C A PÍ T U LO 6 R E V ISI Ó N

107

63. ¿Por qué los guantes de box de 8 onzas golpean más

75. Suelta una piedra desde lo alto de un gran risco.

fuerte que los guantes de 16 onzas?

Identifica el sistema en el que la cantidad de movimiento

64. Tú saltas desde una canoa hacia el muelle cercano y

neta sea cero a medida que cae la piedra.

esperas un aterrizaje sencillo. En vez de ello, caes en el

76. Mientras lanzas una bola hacia arriba, ¿existe un cambio

agua. ¿Cuál es tu explicación para este contratiempo?

en la fuerza normal sobre tus pies? ¿Existe un cambio

65. Explica cómo una nube de insectos voladores puede tener

cuando atrapas la bola? (Piensa que haces esto mientras

una cantidad de movimiento neta de cero.

estás de pie en una báscula de baño.)

66. ¿Cómo una persona completamente vestida, en reposo,

77. Cuando viajas en tu automóvil a rapidez de autopista, la

en medio de un estanque sobre hielo perfectamente sin

cantidad de movimiento de un bicho cambia súbitamente

fricción, puede llegar a la orilla?

cuando se aplasta en tu parabrisas. Comparado con el cambio

67. Si lanzas una bola horizontalmente mientras estás de

en la cantidad de movimiento del bicho, ¿en cuánto cambia la

pie sobre patines de ruedas, rodarás hacia atrás con una

cantidad de movimiento de tu automóvil?

cantidad de movimiento que coincide con la de la bola.

78. Si una bola de tenis y una bola de boliche chocan a mitad

¿Rodarás hacia atrás si realizas los movimientos de lanzar

del aire, ¿cada una experimenta la misma cantidad de

la bola, pero no sueltas la bola? Explica.

cambio en cantidad de movimiento? Defiende tu respuesta.

68. Los ejemplos de los dos ejercicios anteriores pueden

79. Si un camión Mack y un MiniCooper tienen una colisión

explicarse en términos de conservación de la cantidad de

frontal, ¿cuál vehículo experimentará la mayor fuerza

movimiento y en términos de la tercera ley de Newton. En

de impacto? ¿El mayor impulso? ¿El mayor cambio en

caso de que hayas respondido en términos de la conservación

cantidad de movimiento? ¿La mayor desaceleración?

de la cantidad de movimiento, respóndelos también en

80. ¿Una colisión frontal entre dos automóviles es más

términos de la tercera ley de Newton (o viceversa, si ya

dañina para los ocupantes si los vehículos quedan unidos

respondiste en términos de la tercera ley de Newton).

o si rebotan al impacto?

69. He aquí el conocido par de carros unidos con un resorte.

81. Un carro de 0.5 kg sobre una pista de aire se mueve a 1.0 m/s

¿Cuáles son las rapideces relativas de los carros cuando se

hacia la derecha, y se dirige hacia un carro de 0.8 kg que se

suelta el resorte?

mueve hacia la izquierda a 1.2 m/s. ¿Cuál es la dirección de la

cantidad de movimiento del sistema de dos carros?

82. Dos carros idénticos en una mesa de aire se mueven en

m

2 m

ángulos rectos mutuos y tienen una colisión completamente

inelástica. ¿Cuál es la diferencia entre su cantidad de

70. Si colocas una caja sobre un plano inclinado, éste adquiere

movimiento combinada y la cantidad de movimiento inicial

cantidad de movimiento a medida que se desliza hacia abajo.

de cada carro?

¿A qué se debe este cambio en la cantidad de movimiento?

83. En una película, el héroe salta recto hacia abajo desde un

71. Tu amigo dice que la ley de conservación de la cantidad

puente sobre un pequeño bote que sigue moviéndose sin

de movimiento se rompe cuando una bola rueda colina

cambiar su velocidad. ¿Qué propiedad física se rompe

abajo y gana cantidad de movimiento. ¿Tú qué opinas?

aquí?

72. ¿Qué se entiende por sistema, y cómo se relaciona con la

84. Para lanzar una bola, ¿ejerces un impulso sobre ella?

conservación de la cantidad de movimiento?

¿Ejerces un impulso para atraparla con la misma

73. Si lanzas una bola hacia arriba, ¿se conserva la cantidad

rapidez? ¿Aproximadamente cuánto impulso ejerces, en

de movimiento de la bola en movimiento? ¿Se conserva la

comparación, si la atrapas e inmediatamente la lanzas de

cantidad de movimiento del sistema que consiste de bola

vuelta? (Imagina que estás sobre una patineta.)

+ Tierra? Explica tus respuestas.

85. Con referencia a la Figura 6.9, ¿cómo cambiará el

74. La cantidad de movimiento de una manzana que cae

impulso al impacto si la mano de Cassy rebota al golpear

al suelo no se conserva porque la fuerza de gravedad

los ladrillos? En cualquier caso, ¿cuál es la diferencia

externa actúa sobre ella. Pero la cantidad de movimiento

entre la fuerza ejercida sobre los ladrillos y la fuerza

se conserva en un sistema más grande. Explica.

ejercida sobre su mano?

***P I E N S A Y D I S C U T E** (E V A L U A C I Ó N)*

86. Por lo general es mucho más difícil detener un pesado

oponente, ¿qué o quién proporciona el impulso para

camión que un patinador cuando se mueven con la misma

detener los golpes que no conecta?)

rapidez. Discute por qué la patineta en movimiento pudiera

88. Los vagones de ferrocarril están holgadamente acoplados,

requerir más fuerza de frenado. (Considera tiempos relativos.)

de modo que existe un considerable tiempo de demora desde

87. Un boxeador puede golpear un pesado saco durante más

el momento en que el primer vagón se mueve hasta que los

de una hora sin cansarse, pero se cansará rápidamente

últimos vagones se mueven desde el reposo por la

cuando boxee con un oponente durante algunos minutos.

locomotora. Discute la conveniencia de este acoplamiento

¿Por qué? (Sugerencia: cuando el puño del boxeador se

dirige al saco, ¿qué proporciona el impulso para detener

el golpe? Cuando el puño del boxeador se dirige al

holgado entre vagones desde el punto de vista del impulso y

99. Tú tienes un amigo que dice que, después de que una bola

de la cantidad de movimiento.

de golf choca con una bola de boliche en reposo, aunque la

89. Si sólo una fuerza externa puede cambiar la velocidad de

rapidez adquirida por la bola de boliche es muy pequeña, su

un cuerpo, ¿cómo la fuerza interna de los frenos puede

cantidad de movimiento supera la cantidad de movimiento

llevar al reposo a un automóvil en movimiento?

inicial de la bola de golf. Más aún, tu amigo afirma que esto

90. En el Capítulo 5, la propulsión de cohetes se explicó en

se relaciona con la cantidad de movimiento "negativa" de la

términos de la tercera ley de Newton; esto es: la fuerza
bola de golf después de la colisión. Otro amigo dice que estas
que impulsa un cohete proviene de los gases de escape que
son tonterías, que se violaría la conservación de la cantidad de
empujan contra el cohete, la reacción a la fuerza que ejerce
movimiento. ¿Con cuál de tus amigos estás de acuerdo?
el cohete sobre los gases de escape. Discute y explica la
100. Supón que hay tres astronautas afuera de una nave espacial
propulsión de cohetes en términos de conservación de la
y que deciden jugar atrapadas. Todos los astronautas pesan
cantidad de movimiento.
lo mismo sobre la Tierra y son igualmente fuertes. El primer
91. Discute cómo la conservación de la cantidad de movimiento
astronauta lanza al segundo hacia el tercero y comienza el
es una consecuencia de la tercera ley de Newton.
juego. Describe el movimiento de los astronautas conforme
92. Un carro sale disparado de un risco y choca en el suelo del
avanza el juego. ¿Cuánto durará el juego?
cañón abajo. Identifica el sistema en el que la cantidad de
movimiento neta sea cero durante el choque.
93. Bronco salta desde un helicóptero que flota y descubre
que aumenta su cantidad de movimiento. ¿Esto viola la
conservación de la cantidad de movimiento? Explica.
94. Un velero de hielo se pone en

101. La luz posee cantidad de movimiento. Esto puede de-

un lago congelado en un día

mostrarse con un radiómetro, que se muestra en el dibujo.

sin viento. El navegante coloca

Paletas metálicas pintadas de negro en un lado y de blanco

un ventilador como se muestra.

en el otro tienen libertad para girar en

Si todo el viento rebota hacia

torno a la punta de una aguja montada

atrás desde la vela, ¿el velero se

en un vacío. Cuando la luz incide sobre la

pondrá en movimiento? Si es

superficie negra, se absorbe; cuando la luz

así, ¿en qué dirección?

incide sobre la superficie blanca, se refleja.

¿Sobre cuál superficie el impulso de la

95. Discute si tu respuesta al

luz incidente es mayor y en qué sentido

ejercicio anterior sería o no diferente si el aire se detuviera

girarán las paletas? (Giran en dirección

en la vela sin rebotar.

opuesta en los radiómetros más comunes

96. Discute la conveniencia de simplemente quitar la vela en

en los que hay aire presente en la cámara

los ejercicios anteriores.

de vidrio; tu instructor podrá decirte por qué.)

97. ¿Cuál ejerce el impulso más grande sobre una placa de acero:

102. Un deuterón es una partícula nuclear constituida por un

las balas de ametral adora que rebotan de la placa o las

protón y un neutrón. Supón que un deuterón acelera hasta

mismas balas que se deforman y quedan pegadas a la placa?

cierta rapidez en un ciclotrón y se dirige hacia una cámara de

98. El sapo Fred salta verticalmente desde un árbol hacia

observación, donde choca y se queda pegado a una partícula

una patineta que se mueve horizontalmente. La patineta

blanco que inicialmente está en reposo y luego se observa que

frena. Discute dos razones para esto: una en términos de

la combinación se mueve exactamente a la mitad de la rapidez

una fuerza de fricción horizontal entre los pies de Freddy

del deuterón incidente. Discute por qué los observadores afir-

y la patineta, y una en términos de conservación de

man que la partícula blanco es el a misma un deuterón.

cantidad de movimiento.

103. Una bola de bil ar se detendrá poco después cuando choque

de frente con una bola en reposo. Sin embargo, la bola no

se detendrá poco después si la colisión no es exactamente

frontal; esto es: si la segunda bola se mueve a un ángulo

respecto de la trayectoria de la primera. ¿Tú sabes por qué?

(Sugerencia: considera las cantidades de movimiento antes y después de la colisión a lo largo de la dirección inicial de la primera bola y también en una dirección perpendicular a esta dirección inicial.)

104. Cuando un núcleo de uranio estacionario experimenta fisión, se descompone en dos trozos desiguales que se apartan. ¿Qué puedes concluir acerca de las cantidades de movimiento de los trozos? Discute lo que concluyas acerca de las rapideces relativas de los trozos.

Vernier

C A P Í T U L O 7

Energía ***2***

7.1

Trabajo

7.2

Energía potencial

7.3

Energía cinética

7.4

Teorema trabajo-energía

3

7.5

Conservación de la energía

7.6

Máquinas

7.7

Eficiencia

7.8

Fuentes de energía

4

1 *Un carrito fabricado por los alumnos e impulsado por una*

ratonera se suma a la exposición que Christine Lindström realiza

acerca de los conceptos de energía. ***2*** *Neil deGrasse Tyson lamenta que, si nos visitaran extraterrestres, se avergonzaría de decirles que todavía excavamos combustibles fósiles del subsuelo como fuente*

de energía. ***3*** *Christine y David Vernier muestran de un modo*

gracioso el movimiento de un carro sobre una pista. ***4*** *Esta planta fotovoltaica en la base Nellis de la fuerza aérea, en Nevada, es líder en la obtención de energía solar limpia en Estados Unidos.*

110

11

PA R T E U N O

P H

M Y

E S

C IÁCS

N I C A

Uno de los científicos más importantes de Francia la bola desde un punto más fue Émilie du Châtelet, quien vivió en el siglo

elevado, de modo que golpea-

XVIII, cuando toda Europa celebraba los logros

ra la arcilla con tres veces la

de Isaac Newton. Ella no sólo destacó en ciencia, sino
también en filosofía e incluso en estudios bíblicos. Fue la
primera en traducir al francés los Principia de Newton y
anotó su traducción con nuevos resultados en mecánica.
De los muchos amantes de du Châtelet, Voltaire fue
el más famoso. Vivieron juntos durante 15 años, reu-
nieron una biblioteca de más de 20,000 volúmenes y
cada uno estimuló y criticó el trabajo del otro. La suya
fue una de las más emocionantes y apasionadas histo-
rias de amor europeas.

En la época había un gran debate en física sobre la
naturaleza del "empuje" que tenían los objetos en movi-
miento
era proporcional a masa 3 velocidad al cuadrado.
Émilie se embarazó a los 42 años de edad, lo cual era
peligroso en la época. En esa época los médicos no sabían
Dado que Émilie du Châtelet
era tan respetada por la comu-
nidad científica, ella terminó
la controversia al apoyar el
argumento de que el empuje de las cosas en movimiento
era proporcional a masa 3 velocidad al cuadrado.
Émilie se embarazó a los 42 años de edad, lo cual era
peligroso en la época. En esa época los médicos no sabían
dura que no era tres veces más
profunda, sino nueve veces
más profunda (3 al cuadrado).

miento. Los científicos en Inglaterra afirmaban que el
que debían lavarse las manos o esterilizar sus instrumentos.
empuje (lo que ahora se denomina energía cinética) era
No había antibióticos para controlar las infecciones, que
masa 3 velocidad, en tanto que científicos como Gott-
eran frecuentes. Ella murió una semana después del parto.
fried Leibniz en Alemania afirmaban que era masa 3
Voltaire estaba fuera de sí: "perdí la mitad de mí mismo, un
velocidad al cuadrado. Al final, el debate se aclaró con
alma para la cual estaba hecha la mía". La mayor parte de las
las observaciones y un artículo publicado por du Châte-
extensas publicaciones de Voltaire se produjeron antes de la
muerte de Émilie, y después fueron relativamente pocas. Se
let que citaba un experimento sencillo de otro científi-
dice que siguió llorando por ella hasta su vejez.
co para distinguir entre las dos hipótesis. Cuando una
Como aprendiste en el Capítulo 6, el producto de masa
pequeña esfera sólida de latón se soltaba en arcilla, deja-
y velocidad es lo que se llama cantidad de movimiento. En
ba una abolladura. Si la bola golpeaba con el doble de
este capítulo verás que el producto de masa y velocidad
rapidez, y si su empuje era masa 3 velocidad, entonces
al cuadrado (junto con un factor de ½) es lo que se llama
la abolladura en la arcilla debía tener el doble de profun-

energía cinética. Ahora conocerás las formas de energía,

didad. Pero el experimento demostró que la abolladura

incluida la energía cinética. Comienza por considerar un

era cuatro veces más profunda (2 al cuadrado). Soltar

concepto relacionado: trabajo.

7.1 Trabajo

En el Capítulo 6 se vio que los cambios en el movimiento de un objeto dependen tanto La palabra trabajo, en el uso

de la fuerza como de durante cuánto actúa la fuerza. En ese caso, "durante cuánto"

común, significa ejercicio físico o

significa tiempo, y a la cantidad (fuerza 3 tiempo) se le denomina impulso. Pero "du-mental. No confundas la definición

rante cuánto" no siempre significa tiempo; también puede significar distancia. Cuando física de trabajo con la noción

se considera la cantidad (fuerza 3 distancia) se habla de un concepto completamente cotidiana de trabajo. El trabajo es

diferente: trabajo. El ***trabajo*** *es el esfuerzo ejercido sobre algo que cambiará su energía.*

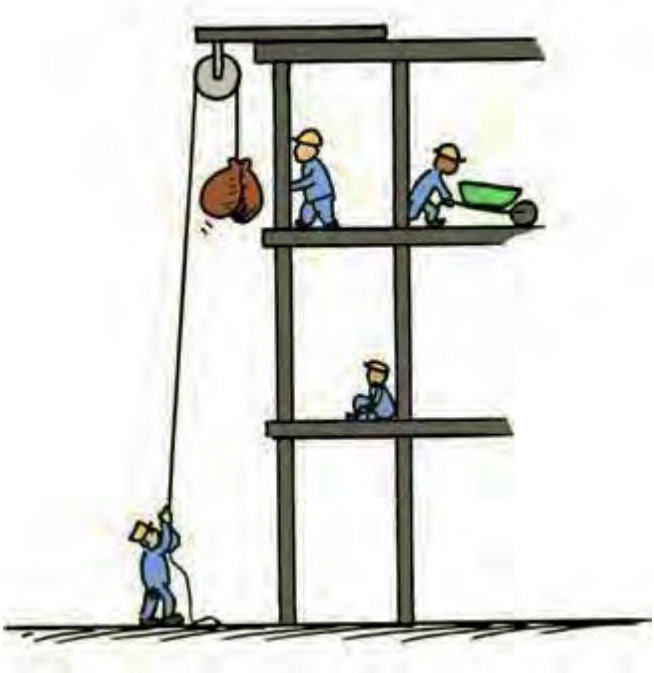
una transferencia de energía.

Cuando levantas una carga de grava contra la gravedad de la Tierra, realizas trabajo.

Cuanto más pesada sea la carga o más alto eleves la carga, más trabajo realizas. Dos cosas entran en escena siempre que se realiza trabajo: 1) la aplicación de una fuerza y 2) el movimiento de algo debido a dicha fuerza. Para el caso más simple, donde la fuerza es constante y el movimiento es en línea recta en la dirección de la fuerza,1 el trabajo realizado sobre un objeto por una fuerza aplicada se define como el producto de la fuerza y la distancia a lo largo de la cual se mueve el objeto.

1Por lo general, el trabajo es el producto sólo del componente de fuerza que actúa en la dirección del movimiento y la distancia que se movió el

objeto. Por ejemplo, si una fuerza actúa en un ángulo con el movimiento, el componente de fuerza paralela al movimiento se multiplica por la distancia movida. Cuando una fuerza actúa en ángulos rectos con respecto a la dirección de movimiento, sin componente de fuerza en la dirección de movimiento, ésta no realiza trabajo. Un ejemplo común es un satélite en una órbita circular; la fuerza de gravedad está en ángulo recto con su trayectoria circular y no se realiza trabajo sobre el satélite. Por tanto, éste orbita sin cambio en rapidez.



F I G U R A 7 . 1

F I G U R A 7 . 2

Si se compara con el trabajo realizado para

Cuando el doble de carga se levanta hasta la

levantar una carga de grava un piso, se ejecuta

misma altura, se realiza el doble de trabajo

el doble de trabajo si se levanta la misma carga

porque la fuerza necesaria para levantarla es

dos pisos. Se realiza el doble de trabajo porque

del doble.

la distancia es del doble.

En resumen:

Trabajo 5 fuerza 3 distancia

W 5 Fd

Si levantas dos cargas de grava un piso, haces el doble de trabajo que si levantaras una carga la misma distancia, porque la fuerza necesaria para levantar el doble de peso es del doble. De igual modo, si levantas una carga dos pisos en lugar de un piso, duplicas el trabajo porque la distancia es del doble.

Se observa que la definición de trabajo tiene que ver tanto con una fuerza como con una distancia. Una levantadora de pesas que sostiene sobre su cabeza una barra que pesa 1,000 newtons no realiza trabajo sobre la barra. Se puede cansar mucho de sostener la barra pero, si no la mueve por la fuerza que ejerce, no realiza ningún trabajo sobre la barra. Puede realizarse trabajo sobre los músculos por estiramiento y contracción, que es fuerza por distancia a una escala biológica, pero este trabajo no se realiza sobre la barra. Más bien, la energía empleada calienta sus brazos. Sin embargo, levantar la barra es otra historia. Cuando la levantadora de pesas eleva la barra desde el suelo, ***F I G U R A 7. 3***

realiza trabajo sobre la barra.

Al levantar la barra se realiza trabajo.

Por lo general, el trabajo se clasifica en dos categorías. Una de ellas es el trabajo ejecutado contra otra fuerza. Cuando un arquero tensa la cuerda de su arco, realiza trabajo contra las fuerzas elásticas del arco. De igual modo, cuando el pistón de un martinete se eleva, se necesita trabajo para elevar el pistón contra la fuerza de gravedad. Cuando haces lagartijas, realizas trabajo contra tu propio peso. Realizas trabajo sobre algo cuando lo obligas a moverse contra la influencia de una fuerza opuesta, con frecuencia la fricción.

La otra categoría de trabajo es el que se efectúa para cambiar la rapidez de un objeto.

Este tipo de trabajo se realiza cuando se lleva un automóvil a adquirir rapidez o cuando se frena. Otro ejemplo de este tipo de trabajo es cuando un club golpea una bola de golf estacionaria y la pone en movimiento. En ambas categorías (trabajo contra una fuerza o para cambiar rapidez), el trabajo involucra una transferencia de energía.

La unidad de medida para el trabajo combina una unidad de fuerza (N) con una unidad de distancia (m); la unidad de trabajo es el newton-metro (N·m), también llamado joule (J), que rima con cool. Un joule de trabajo se realiza cuando una fuerza de 1 N se ejerce a lo largo de una distancia de 1 metro, como cuando levantas una pelota de béisbol sobre tu cabeza. Para valores más grandes, se habla de kilojoules (kJ, miles de joules) o megajoules (MJ, millones de joules). La levantadora de pesas de la Figura 7.3 ***F I G U R A 7. 4***

Aunque gaste energía cuando empuja

realiza trabajo en kilojoules. Detener un camión cargado en su camino cuando se mueve la pared, si la pared no se mueve, no se a 100 km/h exige megajoules de trabajo.

realiza ningún trabajo sobre la pared.

M EC Á N I C A

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Cuánto trabajo se necesita para levantar una bolsa de abarrotes que pesa 200 N a una altura de 3 m?

2. ¿Cuánto trabajo se necesita para levantarla el doble de alto?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *W 5 Fd 5 200 N 3 3 m 5 600 J.*

2. *Levantar la bolsa el doble de alto exige el doble de trabajo (200 N 3 6 m 5 1,200 J).*

Potencia

La definición de trabajo no dice nada sobre cuánto tarda en realizarse el trabajo. Realizas la misma cantidad de trabajo cuando transportas una bolsa de abarrotes en un tramo de escaleras, ya sea que camines o que corras. Pero, ¿por qué estás más cansado Tu corazón usa un poco más de

después de subir corriendo las escaleras en pocos segundos, que después de subirlas 1 W de potencia para bombear la

caminando en algunos minutos? Para comprender esta diferencia, es necesario hablar sangre por tu cuerpo.

de una medida que indique qué tan rápido se realiza el trabajo: la potencia. La ***potencia*** *es la cantidad de trabajo realizado por el tiempo que toma realizarlo: trabajo realizado*

Potencia = intervalo de tiempo

Un motor de gran potencia realiza trabajo rápidamente. El motor de un automóvil que suministra el doble de potencia que otro motor de automóvil no necesariamente produce el doble de trabajo o hace que el automóvil vaya el doble de rápido que el motor menos potente. El doble de potencia significa que el motor puede realizar el doble de trabajo en el mismo tiempo o realizar la misma cantidad de trabajo en la mitad de tiempo. Un motor con más potencia puede hacer que un automóvil adquiera una rapidez dada en menos tiempo que un motor con menos potencia.

He aquí otra forma de ver la potencia: un litro (L) de combustible puede hacer cierta cantidad de trabajo, pero la potencia producida cuando lo quemas puede ser cualquier cantidad, que dependerá de qué tan rápido se

queme. Puede operar una podadora de césped durante media hora o un motor jet durante medio segundo.

La unidad de potencia es el joule por segundo (J/s), también conocida como watt (en ***F I G U R A 7 . 5***

honor de James Watt, el creador de la máquina de vapor en el siglo XVIII). Un watt (W) El cohete Atlas V541 que lanzó al

de potencia se gasta cuando 1 joule de trabajo se realiza en 1 segundo. Un kilowatt (kW) Curiosity a Marte en 2011 ilustra cones igual a 1,000 watts. Un megawatt (MW) es igual a 1 mil ón de watts. En Estados ceptos como empuje (fuerza), trabajo

Unidos, los motores suelen clasificarse en unidades de cabal os de fuerza y la electricidad (fuerza 3 distancia), energía (consumo

en kilowatts, pero puede usarse cualquiera de el as. En el sistema métrico de unidades, de combustible) y potencia (la tasa a la

que se gasta la energía).

los automóviles se clasifican en kilowatts. (Un cabal o de fuerza equivale a 746 watts, de modo que un motor clasificado en 134 cabal os de fuerza es un motor de 100 kW.) ***P U N T O D E C O N T R O L***

1. Si un nuevo modelo de carretilla elevadora tiene el doble de potencia que un modelo antiguo, ¿cuánta más carga puede levantar en la misma cantidad de tiempo? Si levanta la misma carga que la antigua, ¿cuánto más rápido puede funcionar?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

La carretilla elevadora nueva suministra el doble de potencia, de modo que puede levantar el doble de carga en el mismo tiempo o la misma carga en la mitad del tiempo. De cualquier forma, el dueño de la nueva carretilla elevadora está feliz.

C A PÍ T U LO 7 EN ERGÍ A

113

Energía mecánica

Cuando un arquero realiza trabajo para tensar la cuerda de su arco, el arco doblado adquiere la capacidad de realizar trabajo sobre la flecha. Cuando se realiza trabajo para El concepto de energía era des-elevar el pesado pistón de un martinete, el pistón adquiere la capacidad de realizar tra-conocido para Isaac Newton, y su

bajo sobre el objeto que golpea cuando cae. Cuando se realiza trabajo para devanar un existencia todavía era motivo de

mecanismo de resorte, el resorte adquiere la capacidad para realizar trabajo sobre varios debate en la década de 1850. Aun-engranes para operar un reloj, timbrar una campana o sonar una alarma.

que familiar, la energía es difícil de

definir porque es tanto una "cosa"

En cada caso, algo se adquiere que permite al objeto realizar trabajo. Puede ser en la como un proceso, similar tanto a

forma de una compresión de átomos en el material de un objeto, una separación física un sustantivo como a un verbo. La

de cuerpos que se atraen o un reordenamiento de cargas eléctricas en las moléculas de energía se percibe en las cosas sólo

una sustancia. Este "algo" que permite a un objeto realizar trabajo es la ***energía****.2 Al cuando se transfiere o se trans-igual que el trabajo, la energía se mide en joules. Aparece en muchas formas que se forma.*

abordarán en capítulos posteriores. Por ahora, la atención se centrará en las dos formas más comunes de ***energía mecánica****: la energía debida a la posición de algo y la debida al movimiento de algo. La energía mecánica puede estar en la forma de energía potencial, energía cinética o la suma de las dos.*

7.2 *Energía potencial*

Un objeto puede almacenar energía en virtud de su posición. La energía que se almacena y se mantiene disponible se denomina ***energía potencial*** *(EP) porque en el estado almacenado tiene el potencial de realizar trabajo. Un resorte estirado o comprimido, por ejemplo, tiene el potencial de realizar trabajo. Cuando un arco se tensa, se almacena energía en el arco. El arco puede realizar trabajo sobre la flecha. Una banda de*
SCREENCAST: Trabajo y energía

potencial

caucho estirada tiene energía potencial debido a la posición relativa de sus partes. Si la banda de caucho es parte de un tirachinas, es capaz de realizar trabajo.

La energía química de los combustibles también es energía potencial. En realidad es energía de posición a nivel submicroscópico. Esta energía queda disponible cuando las posiciones de las cargas eléctricas dentro y entre moléculas se altera; esto es: cuando ocurre una reacción química. Cualquier sustancia que pueda hacer trabajo mediante acción química tiene energía potencial. La energía potencial se encuentra en los combustibles fósiles, baterías eléctricas y los alimentos que consumes.

Para elevar los objetos contra la gravedad de la Tierra se necesita trabajo. La energía potencial debida a posiciones elevadas se llama energía potencial gravitacional. El agua en un depósito elevado y el pistón elevado de un martinete tienen ambos energía potencial gravitacional. Siempre que se realiza trabajo, se intercambia energía.

La cantidad de energía potencial gravitacional que tiene un objeto elevado es igual al trabajo realizado contra la gravedad para elevarlo. El trabajo realizado es igual a la fuerza necesaria para moverlo hacia arriba por la distancia vertical que se mueve (recuerda W 5 Fd). La fuerza ascendente que se necesita mientras se mueve con velocidad constante es igual al peso, mg, del objeto, de modo que el trabajo realizado para levantarlo hasta una altura h es el producto mgh:

Energía potencial gravitacional 5 peso 3 altura

EP 5 mgh

Observa que la altura es la distancia por arriba de determinado nivel de referencia elegido, como el suelo o el piso de un edificio. La energía potencial gravitacional, mgh, es relativa a dicho nivel y sólo depende de mg y de h. En la Figura 7.6 puedes ver que la energía potencial de la bola elevada no depende de la trayectoria que se sigue para alcanzar dicho nivel.

2Estrictamente hablando, lo que permite a un objeto realizar trabajo es su energía disponible pues no toda la energía en un objeto puede transformarse en trabajo.

3 m

5 m

(a)

(b)

(c)

F I G U R A 7 . 6

La energía potencial de la bola de 10 N es la misma (30 J) en los tres casos, porque el trabajo realizado para elevarla 3 m es el mismo ya sea que (a) se eleve con 10 N de fuerza, (b) se empuje con 6 N

de fuerza en dirección ascendente del plano inclinado de 5 m o (c) se eleve con 10 N cada peldaño de ***EP***

1 m. Cuando se mueve la bola horizontalmente no se realiza trabajo (si se ignora la fricción).

La energía potencial, gravitacional o de otro tipo, sólo tiene significado cuando cam-EC

bia: cuando realiza trabajo o se transforma en energía de alguna otra forma. Por ejemplo, si la bola de la Figura 7.6 cae desde su posición elevada y realiza 30 joules de trabajo cuando aterriza, entonces pierde 30 joules de energía potencial. La energía potencial de la bola o cualquier objeto guarda relación con un determinado nivel de referencia. Sólo los

cambios de energía potencial son significativos. Uno de los tipos de energía en los ***F I G U R A 7 . 7***

que puede cambiar la energía potencial es la energía de movimiento o energía cinética.

La energía potencial del pistón elevado

del martinete se convierte en energía

cinética cuando se libera.

P U N T O D E C O N T R O L

EP = EP

1. ¿Cuánto trabajo se realiza para levantar el bloque de hielo de 100 N una distancia vertical de 2 m, como se muestra en la Figura 7.8?

2. ¿Cuánto trabajo se realiza para empujar el mismo bloque de hielo hacia arriba de la rampa de 4 m de largo? (La fuerza necesaria sólo es de 50 N, que es la razón por la que se utilizan rampas.)

3. ¿Cuál es el aumento de energía potencial gravitacional del bloque en F I G U R A 7 . 8

cada caso?

Ambos realizan el mismo trabajo para

elevar el bloque.

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *W 5 Fd 5 100 N 3 2 m 5 200 J.*

2. *W 5 Fd 5 50 N 3 4 m 5 200 J.*

3. *En ambos casos la energía potencial del bloque aumenta en 200 J. La rampa simplemente hace que este trabajo sea más fácil de realizar.*

7.3 *Energía cinética*

Si empujas un objeto, puedes ponerlo en movimiento. Si un objeto está en movimiento, entonces es capaz de realizar trabajo. Tiene energía de movimiento. Se dice que tiene ***energía cinética*** *(EC). La energía cinética de un objeto depende tanto de la masa del objeto como de su rapidez. Es*

igual a la masa multiplicada por el cuadrado de la ***SCREENCAST: Energías potencial***

rapidez, multiplicada por la constante ½:

y cinética

Energía cinética = 1 masa × rapidez2

2

EC 1

2

= mv

2

C A PÍ T U LO 7 EN ERGÍ A

115

Energía potencial a Potencial + cinética a Energía cinética a Energía potencial, y así sucesivamente

F I G U R A 7 . 9

Transiciones de energía en un péndulo. La EP es en relación con el punto más bajo del péndulo, cuando es vertical.

Cuando lanzas una bola, haces trabajo sobre ella para darle rapidez al tiempo que abandona tu mano. Entonces, la bola en movimiento puede golpear algo y empujarlo, con lo que realiza trabajo sobre lo que golpea. La energía cinética de un objeto en movimiento es igual al trabajo necesario para llevarlo desde el reposo hasta su rapidez, o al trabajo que el objeto puede realizar mientras se lleva al reposo:

Fuerza neta 3 distancia 5 energía cinética

o, en notación simbólica,

F I G U R A 7 . 1 0

Fd = 1 mv 2

La energía potencial del arco tenso de

2

Tenny es igual al trabajo (fuerza prome-

Observa que la rapidez es al cuadrado, de modo que si la rapidez de un objeto se du- dio 3 distancia) que realizó para poner plica, su energía cinética se cuadruplica (22 5 4). En consecuencia, se necesita 4 veces la flecha en posición. Cuando la flecha más trabajo para duplicar la rapidez. Siempre que se realiza trabajo, cambia la energía. se suelte, la mayor parte de la energía potencial del arco tenso se convertirá en

energía cinética de la flecha.

VIDEO: Bola de boliche y la

conservación de la energía

Traba

F I G U R A 7 . 1 1

F I G U R A 7 . 1 2

El péndulo se balanceará hasta su altura

La “caída” cuesta abajo de la montaña rusa resulta

original ya sea que esté o no presente la

en una rapidez tremenda durante la bajada, y esta

traba.

energía cinética la envía de vuelta arriba de la pista

inclinada hacia la siguiente cima.

***7.4** Teorema trabajo-energía*

La energía es la forma como

Cuando un automóvil incrementa su rapidez, su ganancia en energía cinética proviene la naturaleza lleva las cuentas.

del trabajo realizado sobre él. O cuando un automóvil en movimiento frena, se realiza

¡Los embaucadores que venden

trabajo para reducir su energía cinética. Se puede decir:3

máquinas fabricadoras de energía

se aprovechan del financiamiento

Trabajo 5 ΔEC

proveniente de carteras abultadas y

cerebros huecos!

Trabajo es igual a cambio en energía cinética. Éste es el ***teorema trabajo-energía****.*

El trabajo en esta ecuación es el trabajo neto; esto es: el trabajo con base en la fuerza 3Esta ecuación puede derivarse del siguiente modo: si ambos lados de F 5 ma (segunda ley de Newton) se multiplican por d, se obtiene Fd = mad. Recuerda del Capítulo 3 que, para aceleración constante desde el reposo, d 5 1

( ) at 2, de modo que es posible decir que Fd 5 ma 1() at 2() 5 1() maat 2, y al sustituir v 5 at, se obtiene 2

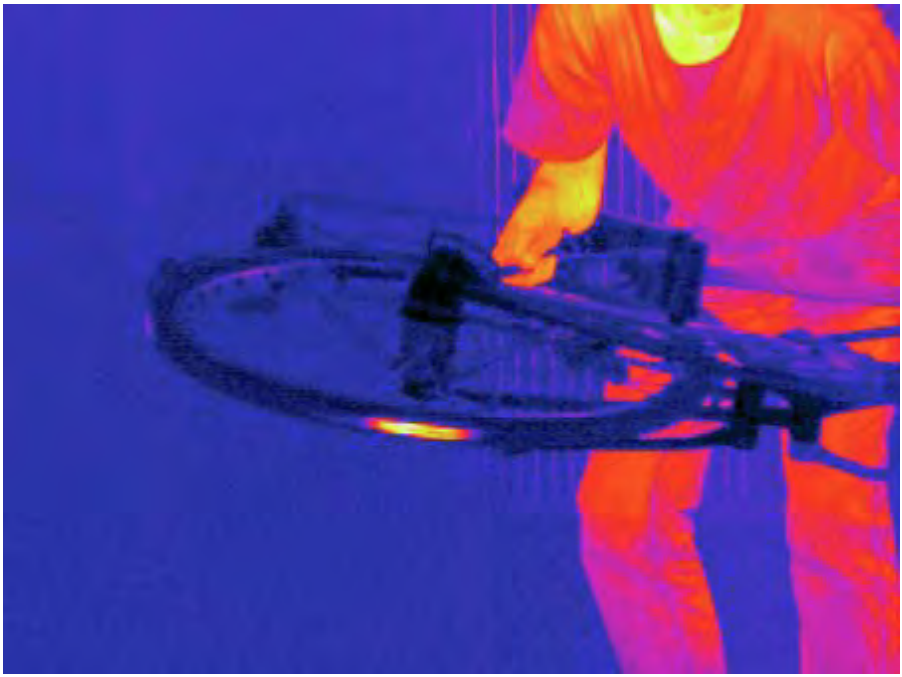
2

2

Fd 5 1

( ) mv 2. Esto es: Trabajo 5 EC ganada.

2



F I G U R A 7 . 1 3

Debido a la fricción, se transfiere energía neta. Si, por ejemplo, empujas un objeto y la fricción también actúa sobre el objeto, tanto al piso como a la llanta cuando la

el cambio de energía cinética es igual al trabajo realizado por la fuerza neta, que es tu bicicleta derrapa hasta detenerse. Una

empuje menos la fricción. En este caso, sólo parte del trabajo total que realizas cambia cámara infrarroja revela el rastro de la

la energía cinética del objeto. El resto, la fricción lo transforma en energía térmica. Si la llanta calentada (la banda roja sobre el

fuerza de fricción es igual y opuesta a tu empuje, la fuerza neta sobre el objeto es cero piso, izquierda) y el calentamiento de la

y no se realiza trabajo neto. Entonces no hay cambio en la energía cinética del objeto.

llanta (derecha). (Cortesía de Michael

Vollmer.)

El teorema trabajo-energía también se aplica para rapidez decreciente. Cuando pisas los frenos de un automóvil y éste derrapa, el camino realiza trabajo sobre el automóvil.

Este trabajo es la fuerza de fricción multiplicada por la distancia sobre la cual actúa la fuerza de fricción.

Es interesante saber que la fricción máxima que el camino puede suministrar a una llanta que derrapa es casi la misma ya sea que el automóvil se mueva en forma lenta o rápida. Un automóvil que se mueve al doble de rapidez que otro automóvil necesita cuatro veces (22 5 4) más trabajo para detenerse. Dado que la fuerza de fricción es casi la misma para ambos vehículos, el más rápido derrapa cuatro veces más lejos antes de detenerse. De modo que, como saben bien los investigadores de accidentes, un automóvil que va a 100 km/h tiene cuatro veces la energía cinética que tendría a 50 km/h, y el vehículo derrapa cuatro veces más lejos con sus llantas bloqueadas de lo que derraparía con una rapidez de 50 km/h. La energía cinética depende de la rapidez al cuadrado. El mismo razonamiento se aplica a los frenos antibloqueo (que evitan que las llantas se derrapen para mantener el agarre del camino sobre las llantas). Para la llanta que no derrapa, la máxima fricción del camino también es casi independiente de la rapidez, de modo que incluso con frenos antibloqueo, se necesita cuatro veces la distancia de frenado al doble de rapidez.

Cuando un automóvil frena y las llantas no derrapan, los tambores convierten la energía cinética en energía térmica. Si las llantas derrapan, las huel as de las llantas y el camino se calientan, no los frenos. Algunos conductores están familiarizados con otra forma de frenar un vehículo: cambiar a una velocidad baja y permitir que el motor realice el frenado. Los automóviles híbridos de hoy en día hacen algo similar; usan un

generador eléctrico para convertir la energía cinética del automóvil que frena en energía eléctrica que puede almacenarse en baterías, donde se usa para complementar la energía producida por la combustión de gasolina. (En el Capítulo 25 se describe cómo se hace esto.) El teorema trabajo-energía puede aplicarse a algo más que los cambios en energía cinética. Cuando una fuerza externa realiza trabajo, puede decirse que trabajo 5 Δ E, donde E representa todos los tipos de energía. El trabajo no es una forma de energía, sino una forma de transferir energía de un lugar a otro o de una forma a otra.4

La energía cinética y la energía potencial son dos entre muchas formas de energía, y son la base de otras formas de energía, como la energía química, la energía nuclear y la ***SCREENCAST: Teorema***

energía transportada por el sonido y la luz. La energía cinética del movimiento molecular ***trabajo-energía***

aleatorio se relaciona con la temperatura; las energías potenciales de las cargas eléctricas 4La primera ley de la termodinámica, escrita Δ E 5 W 1 Q, establece que el cambio de energía de un sistema es el trabajo realizado sobre él más la cantidad de calor transferida hacia él.

explican el voltaje, y las energías cinética y potencial del aire en vibración definen la intensidad sonora. Incluso la energía luminosa se origina del movimiento de los electrones dentro de los átomos. Toda forma de energía puede transformarse en cualquier otra forma.

P U N T O D E C O N T R O L

1. Si conduces a 90 km/h, ¿cuánta distancia adicional necesitarías para detenerte que si condujeras a 30 km/h?

2. ¿Un objeto puede tener energía?

3. ¿Un objeto puede tener trabajo?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Nueve veces más. El automóvil tiene 9 veces más energía cinética cuando viaja 3*

veces más rápido: 12 m(3 v)2 5 12 m 9 v 2 5 9 12 mv 2 . La fuerza de fricción generalmente será la misma en cualquier caso; por tanto, 9 veces más trabajo requiere 9 veces más distancia.

2. *Sí, pero en un sentido relativo. Por ejemplo, un objeto elevado puede tener EP en relación con el suelo, pero no energía en relación con un punto a la misma altura.*

De igual manera, la EC que tiene un objeto guarda relación con un marco de referencia, por lo general la superficie de la Tierra. (Verás que los objetos materiales tienen energía de ser, E = mc 2, la energía coagulada que constituye sus masas.

¡Sigue leyendo!)

3. *No. A diferencia de la cantidad de movimiento o la energía, el trabajo no es algo que un objeto tenga. El trabajo es energía en tránsito. Es la energía transferida cuando una fuerza actúa sobre un objeto a medida que éste se mueve a lo largo de una distancia.*

7.5 *Conservación de la energía*

Más importante que saber qué es la energía es comprender cómo se comporta: cómo Los inventores tienen cuidado:

se transforma. Es posible comprender mejor los procesos y cambios que ocurren en la cuando introducen una idea nueva,

naturaleza si los analizas en términos de cambios de energía — transformaciones de una primero se aseguran de que esté

forma en otra— o de transferencias de una ubicación a otra. La energía es la forma dentro del contexto de lo que se

sabe en la actualidad. Por ejemplo,

como la naturaleza lleva las cuentas.

cualquier idea nueva debe ser

Considera los cambios de energía en la operación del martinete de la Figura 7.7. Se congruente con la conservación de

realiza trabajo para elevar el pistón, lo que le da energía potencial, que se convierte en la energía.

energía cinética cuando el pistón se suelta. Esta energía se transfiere al pilote bajo él.

Lo ideal es que la distancia que el pilote penetra en el suelo multiplicada por la fuerza de impacto promedio, que es el trabajo realizado sobre el pilote, sea igual a la energía potencial inicial del pistón. Si se tiene en cuenta toda la energía térmica y sonora, se descubre que la energía se transforma sin pérdida o ganancia neta. ¡Extraordinario!

El estudio de varias formas de energía y sus transformaciones de una forma a otra condujo a una de las más grandes generalizaciones de la física: la ***ley de conservación SCREENCAST: Conservación***

de la energía*:*

de la energía

La energía no se puede crear ni destruir; puede transformarse de una forma a otra, pero la cantidad total de energía nunca cambia.

Cuando se considera cualquier sistema en su totalidad, ya sea tan sencillo como un péndulo que se balancea o tan complejo como una supernova que explota, hay una cantidad que no se crea ni se destruye: la energía. La energía puede cambiar de forma o simplemente transferirse de un lugar a otro, pero, como aprendieron los científicos, la cantidad total de energía permanece igual. Esta cantidad de energía toma en cuenta

EP = 10,000

EC = 0

EP = 7,500

F I G U R A 7 . 1 4

EC = 2,500

Los tranvías sobre las inclinadas colinas de San Francisco se transfieren energía entre sí de un modo muy eficaz mediante el cable que está bajo la calle. El cable forma un bucle completo que conecta los tranvías que marchan tanto colina arriba como colina abajo. De esta manera, el carro que baja por la colina realiza trabajo sobre un carro que sube por la colina. Por lo tanto, el incremento de la EP gravitacional de un carro que asciende por la colina se debe a la disminución de la EP = 5,000

EP gravitacional de un carro que desciende por la colina.

EC = 5,000

el hecho de que los átomos que constituyen la materia son ellos mismos paquetes concentrados de energía. Cuando los núcleos de los átomos se reordenan, pueden liberar-EP = 2,500

se enormes cantidades de energía. El Sol brilla porque parte de su energía nuclear se EC = 7,500

transforma en energía radiante.

La enorme compresión debida a la gravedad y a las temperaturas extremadamente altas en el interior profundo del Sol funden y unen núcleos de átomos de hidrógeno para formar núcleos de helio. Esto es fusión termonuclear, un proceso que libera energía radiante, una pequeña parte de la cual llega a la Tierra. Parte de la energía que llega EP = 0

a la Tierra cae sobre las plantas (y sobre otros organismos fotosintéticos) y parte de EC = 10,000

ésta, a su vez, se almacena después en forma de carbón. Otra parte sostiene la vida en la cadena alimenticia que comienza con las plantas (y otros fotosintetizadores) y parte ***F I G U R A 7 . 1 5***

de esta energía se almacena después en el petróleo. Parte de la energía del Sol entra en Un buzo de circo en lo alto de un poste

tiene una EP de 10,000 J. Cuando salta,

la evaporación del agua del océano, y parte de ésta regresa a la Tierra en forma de llu-su EP se convierte en EC. Observa que,

via que puede atraparse detrás de una presa. En virtud de su posición elevada, el agua en posiciones sucesivas de un cuarto, un

detrás de una presa tiene energía que puede utilizarse para impulsar una planta gene-medio, tres cuartos y cuando está abajo,

radora abajo, donde se transformará en energía eléctrica. La energía viaja por cables a la energía total es constante.

las casas, donde sirve para iluminar, calentar, cocinar y operar dispositivos eléctricos.

¡Qué maravilla que la energía se transforme de una forma a otra!

ENERGÍA Y TECNOLOGÍA

Trata de imaginar la vida antes de que los seres humanos La sociedad se ha acostumbrado tanto a los beneficios de la controlaran la energía. Imagina la vida doméstica sin

tecnología que sólo está vagamente consciente de su dependencia de las luz eléctrica, refrigeradores, sistemas de calefacción

presas, las plantas eléctricas, la transportación masiva, la electrificación, y enfriamiento, teléfono ni los dispositivos electrónicos que

la medicina moderna y la ciencia agrícola moderna para su mera

utilizamos, por no mencionar el automóvil familiar. Se puede

existencia. Cuando disfrutas una comida sabrosa, piensas poco en la

pensar de un modo romántico que la vida sería mejor sin ellos,

tecnología que se utilizó para cultivar, cosechar y llevar el alimento a la pero sólo si no tienes en cuenta las horas de trabajo diario

mesa. Cuando se enciende una luz, se piensa poco en la red eléctrica de dedicadas a lavar la ropa, cocinar y calentar las casas. También

control central que enlaza las líneas de transmisión de larga distancia o habría que ignorar lo difícil que era conseguir un médico en

en las estaciones eléctricas dispersas. Donde dichas líneas actúan como momentos de emergencia antes de la llegada del teléfono,

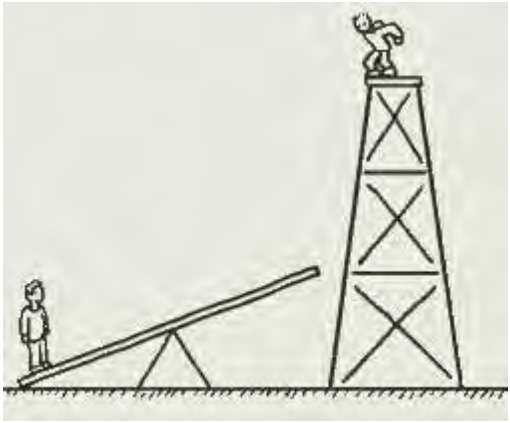
arterias productivas de la industria, el transporte y la electrificación de cuando un médico tenía en su maletín poco más que laxantes,

la sociedad. Quienquiera que piense que la ciencia y la tecnología son aspirinas y píldoras de azúcar, y cuando las tasas de mortalidad

“inhumanas” es porque no ha logrado comprender las maneras en las

infantil eran asombrosas.

que hacen que la vida sea más humana.



C A PÍ T U LO 7 EN ERGÍ A

FÍSICA EN EL CIRCO

E l acróbata Art, con masa m, está de pie en el extremo ***(b)*** *EP =BartEPArt izquierdo de un subibaja. El acróbata Bart, con masa M,*

Mgh

=

Bart

mgh

salta desde una altura h sobre el extremo derecho del

Art

subibaja y, por tanto, impulsa a Art hacia el aire.

M

h

=

Art

h.

(a) *Si desprecias ineficiencias, ¿cuál es la diferencia entre la EP de m*

Art en la parte superior de su trayectoria y la EP de Bart justo

M

(70 kg)

antes de saltar?

(c) *h Art*

h =

4 m

7 m

M

m

$\left(\left| 40\ kg \right)\right|$

$=$

(b) *Demuestra que, idealmente, Art alcanza una altura m h.*

(c) *Si la masa de Art es 40 kg, la masa de Bart es 70 kg y la altura Bart*

del salto inicial era 4 m, demuestra que Art se eleva una

distancia vertical de 7 m.

SOLUCIÓN

Art

h

(a) *Si desprecias ineficiencias, toda la EP inicial de Bart antes de caer se convierte en la EP de Art al elevarse hasta su cima; esto*

es: en el momento en que la EC de Art es igual a cero.

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Un automóvil consume más combustible cuando su aire acondicionado se enciende? ¿Cuando sus luces se encienden? ¿Cuando su radio se

SCREENCAST: La energía

enciende mientras el motor se apaga en un estacionamiento?

de acróbatas

2. ¿La energía eléctrica que se genera en los generadores eólicos afecta la rapidez del viento? Esto es: ¿las localidades detrás de los generadores de viento tendrían más vientos si los generadores no estuvieran ahí?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

SCREENCAST: Péndulo balístico

1. *La respuesta a las tres preguntas es sí, pues la energía consumida a final de cuentas proviene del combustible.*

Incluso la energía tomada de la batería debe regresar a

la batería por medio del alternador, al cual enciende el

motor, que funciona con la energía del combustible. ¡No

hay comida gratuita!

?

2. *Los generadores eólicos toman EC del viento, de modo*

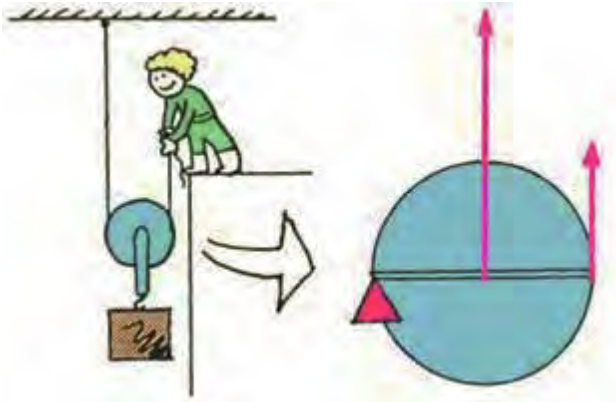
que el viento es frenado por la interacción con los

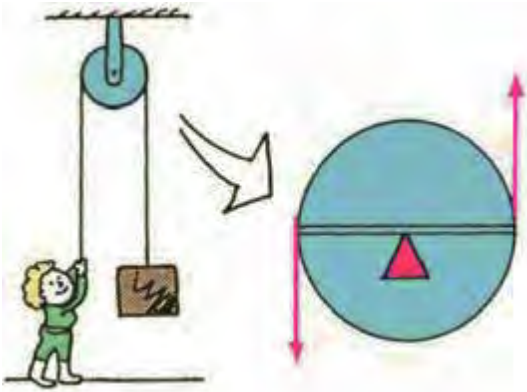
álabes. Así es que, sí, habría más viento detrás de los

generadores eólicos si no estuvieran ahí.

Energía reciclada

La energía reciclada es energía reutilizada que de otro modo se desperdiciaría. Una planta eléctrica común que quema combustible fósil desecha cerca de dos tercios de la energía presente en el combustible como energía térmica de desecho. Sólo alrededor de un tercio del insumo de energía se convierte en electricidad útil. ¿Qué otro negocio desperdicia dos tercios de sus insumos? Esto no siempre fue así. Las primeras plantas eléctricas de Thomas Edison, a finales de la década de 1880, convertían muchos más insumos de energía para propósitos útiles que las plantas sólo eléctricas de la actualidad. Edison utilizaba el calor desprendido de sus generadores para calentar las casas y fábricas cercanas. La compañía que fundó todavía suministra calor a miles de edificios en Manhattan a través del sistema de vapor comercial más grande del mundo. Nueva York no es la única: la mayor parte de





las casas en la región que rodea a Copenhague, Dinamarca, se calienta con el calor proveniente de las plantas eléctricas. Más de la mitad de la energía utilizada en Dinamarca es energía reciclada. Por el contrario, la energía reciclada en Estados Unidos representa menos de 10% de toda la energía

usada. Una razón principal es que en la actualidad las plantas eléctricas se construyen generalmente lejos de los edificios que se beneficiarían de la energía reciclada. Sin embargo, no es posible seguir arrojando energía térmica al cielo en un lugar y luego quemar más combustible fósil para suministrar calor en alguna otra parte. Está atento a más reciclamiento de energía.

7.6 Máquinas

*Una **máquina** es un dispositivo que multiplica una fuerza o simplemente cambia la dirección de las fuerzas. El principio que subyace a toda máquina es el concepto de **conservación de la energía**. Piensa en una de las máquinas más sencillas, la **palanca** F*

(Figura 7.16). Al mismo tiempo que realizas trabajo sobre un extremo de la palanca, d

d

el otro extremo hace trabajo sobre la carga. Se observa que la dirección de la fuerza cambia: si empujas hacia abajo, la carga se eleva. Si el trabajo realizado por las fuerzas F

de fricción y por el peso no equilibrado de la palanca es tan pequeño como para desd = F

F

d

preciarse, entonces la entrada de trabajo será igual a la salida de trabajo:
F I G U R A 7 . 1 6

Entrada de trabajo 5 salida de trabajo

La palanca.

Dado que el trabajo es igual a fuerza por distancia, fuerza de entrada 3 distancia de entrada 5 fuerza de salida 3 distancia de salida:

(Fuerza 3 distancia)entrada 5 (fuerza 3 distancia)salida

5,000 N

El punto de apoyo sobre el cual gira una palanca se llama fulcro. Cuando el fulcro de una palanca está relativamente cerca de la carga, una pequeña fuerza de entrada producirá una gran fuerza de salida. Esto se debe a que

la fuerza de entrada se ejerce por toda una gran distancia y la carga se mueve una distancia correspondientemente corta. De 25 cm

modo que una palanca puede ser un multiplicador de fuerza. Pero ninguna máquina puede multiplicar el trabajo o multiplicar la energía. ¡Esto definitivamente no es posible en la conservación de la energía!

Arquímedes, un famoso científico griego del siglo III a. C., comprendía el principio d = F

F

d

de la palanca. Afirmó: "Denme un punto de apoyo y moveré el mundo".

50 × 25 = 5,000 × 0.25

En la actualidad, un niño puede aplicar el principio de la palanca para elevar con un gato el frente de un automóvil. Al ejercer una pequeña fuerza sobre una gran distancia, ***F I G U R A 7 . 1 7***

ésta puede suministrar una gran fuerza que actúe en una pequeña distancia. Considera Fuerza de entrada 3 distancia de

el ejemplo que se ilustra en la Figura 7.17. Cada vez que la niña empuja la palanca del entrada 5 fuerza de salida 3 distancia

gato 25 centímetros, el auto se eleva sólo una centésima de esa distancia, pero con 100

de salida.

veces la fuerza. (La niña está feliz de que un trinquete sostenga el automóvil en su posición elevada mientras ella se prepara para su siguiente golpe que elevará el automóvil.) Otra máquina simple es una polea. ¿Te das cuenta de que es una palanca "disfrazada"? Cuando se usa como en la Figura 7.18a, la polea sólo cambia la dirección de la fuerza; pero cuando se usa como en la Figura 7.18b, duplica la fuerza de salida. La fuerza
VIDEO: Máquinas: poleas

aumenta y la distancia recorrida disminuye. Como sucede con cualquier máquina, las fuerzas pueden cambiar aunque el trabajo de entrada y el trabajo de salida no cambien.

F I G U R A 7 . 1 8

(a) Esta polea actúa como una palanca

Salida

con brazos de palanca iguales. Sólo

Salida

cambia la dirección de la fuerza de

Entrada

entrada. (b) En este arreglo, una carga

puede levantarse con la mitad de la

fuerza de entrada. Observa que el

“fulcro” está en el extremo izquierdo en

lugar de estar en el centro.

(a)

Entrada

(b)

C A PÍ T U LO 7 EN ERGÍ A

121

Un polispasto es un sistema de poleas que multiplica la

F I G U R E 7 . 1 9

fuerza más de lo que puede hacerlo una sola polea. Con el

Fuerza aplicada 3 distancia aplicada 5

sistema de poleas ideal que se muestra en la Figura 7.19,

fuerza de salida 3 distancia de salida.

el hombre jala 7 m de soga con una fuerza de 50 N y eleva

una carga de 500 N por una distancia vertical de 0.7 m. La

energía que el hombre gasta para jalar la soga es numérica-

mente igual al aumento de energía potencial del bloque de

500 N. La energía se transfiere del hombre a la carga.

Cualquier máquina que multiplica una fuerza lo hace a

costa de la distancia. Del mismo modo, cualquier máquina

500 N

que multiplica la distancia, como tu antebrazo y codo, lo

hace a costa de una fuerza. Ninguna máquina o dispositivo

$d = F$

F

d

puede sacar más energía de la que se pone en ella. Ninguna

máquina puede crear energía; sólo puede transferir energía

SCREENCAST: Máquinas y energía

o transformarla de una forma a otra.

7.7 Eficiencia

Los tres ejemplos previos fueron de máquinas ideales: 100% del trabajo de entrada Una máquina puede multiplicar

fuerza, más nunca energía, ¡de

aparecía como trabajo de salida. Una máquina ideal operaría al 100% de eficiencia. En ninguna manera!

la práctica, esto no sucede, y nunca se puede esperar que ocurra. En cualquier transformación, se disipa algo de energía en energía cinética molecular —energía térmica— lo cual hace que la máquina y sus alrededores se vuelvan más calientes.

Incluso una palanca se balancea en torno a su fulcro y convierte una pequeña fracción de la energía de entrada en energía térmica. Puedes realizar 100 J de trabajo y obtener 98 J de trabajo. Entonces la palanca es 98% eficiente y sólo se degradan 2 J de Una máquina de movimiento

trabajo de entrada en energía térmica. Si la niña de la Figura 7.17 pone 100 J de trabajo perpetuo (un dispositivo que puede

realizar trabajo sin entrada de

y aumenta la energía potencial del automóvil en 60 J, el gato tiene una eficiencia de energía) es imposible que exista.

60%; 40 J de su trabajo de entrada se aplicaron contra la fricción y aparecieron como Pero el movimiento perpetuo en sí

energía térmica.

mismo definitivamente sí existe. Por

En un sistema de poleas, una fracción considerable de la energía de entrada por lo ejemplo, los átomos y sus electrones,

general se transforma en energía térmica. Si realizas 100 J de trabajo, las fuerzas de y las estrellas y sus planetas, están en

fricción que actúan a lo largo de las distancias por las cuales corren las poleas y frotan un estado de movimiento perpetuo.

contra sus ejes pueden disipar 60 J de energía como energía térmica. En este caso, el El movimiento perpetuo es el orden

natural de las cosas.

trabajo de salida sólo es de 40 J y el sistema de poleas tiene una eficiencia de 40%.

Parte de la energía de entrada también se puede "desperdiciar" al transformarse en energía potencial del propio sistema de poleas a medida que se eleva. Cuanto menor sea la eficiencia de una máquina, mayor será el porcentaje de energía que se degrade en energía térmica.

La ineficiencia existe siempre que la energía en el mundo que te rodea se transforme de una forma a otra. La ***eficiencia*** *puede expresarse como una razón: salida de energía útil*

Eficiencia = entrada de energía total

El motor de un automóvil es una máquina que transforma la energía química almacenada en el combustible en energía mecánica. Los enlaces entre las moléculas en el combustible de petróleo se descomponen cuando se quema el combustible. Los átomos de carbono en el combustible se combinan con el oxígeno del aire para formar dióxido de carbono, los átomos de hidrógeno en el combustible se combinan con el oxígeno para formar agua, y la energía se libera. Sería estupendo que toda esta energía pudiera convertirse en energía mecánica útil; es decir, sería estupendo que ***F I G U R A 7. 2 0***

se pudiera tener un motor que fuera 100% eficiente. Sin embargo, esto es imposible, Helen Yan lleva buena energía a su pues mucha de la energía se transforma en energía térmica, un poco de la cual pue- clase de laboratorio en el City College de aprovecharse para calentar a los pasajeros en el invierno, pero la mayor parte se de San Francisco.

F I G U R A 7 . 2 1

Transiciones de energía. El cementerio

Energía

de la energía mecánica es la energía

potencial

Energía cinética

térmica.

(del peso)

Todavía más calor

+ Calor de

+ más calor

(movimiento

movimiento

de movimiento

molecular más

molecular

molecular

rápido)

a Menos energía

cinética + más energía potencial

a Energía cinética + potencial a Calor (energía

Energía química

cinética de moléculas)

desperdicia. Alguna sale junto con los gases de escape calientes, y alguna se disipa en el aire a través del sistema de enfriamiento o directamente desde las partes calientes del motor.5

Cuando se comparan las eficiencias

Considera la ineficiencia que acompaña las transformaciones de la energía de esta de las formas de transporte, se

forma: en cualquier transformación existe una disolución de la energía útil disponible.

descubre que el más eficiente es

La cantidad de energía útil disminuye con cada transformación hasta que no queda nada el ser humano en una bicicleta,

más que energía térmica a temperatura ordinaria. Cuando estudies termodinámica verás mucho más eficiente que viajar

que la energía térmica es inútil para realizar trabajo a menos que pueda transformarse en tren o automóvil, e incluso que

a una temperatura inferior. Una vez que llega a la temperatura práctica más baja, la del la de los peces y otros animales.

ambiente, no se puede usar. El ambiente que te rodea es el cementerio de la energía útil.

¡Bravo por las bicicletas y quienes

las usan!

P U N T O D E C O N T R O L

1. Piensa en un milagroso automóvil imaginario que tenga un motor 100%

eficiente y queme combustible que tenga un contenido energético de 40 MJ

por litro. Si el arrastre aerodinámico total y las fuerzas de fricción globales sobre el automóvil que viaja con rapidez de autopista es de 500 N, ¿cuánto podría el automóvil recorrer por litro de combustible a esta rapidez?

2. Si el mismo automóvil es impulsado por un motor 25% eficiente, ¿cuán lejos puede viajar, a rapidez de autopista, con 1 litro de combustible?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *De acuerdo con la definición de trabajo 5 fuerza 3 distancia, un reordenamiento sencillo produce distancia 5 trabajo/fuerza. Si todos los 40 millones de J de energía que hay en 1 L se usan para hacer el trabajo de superar el arrastre aerodinámico y las fuerzas de fricción, la distancia es*

trabajo

40,000,000 J/L

Distancia =

=

= 80,000 m/L = 80 km/L

fuerza

500 N

(Esto es aproximadamente 190 mi/gal.) El punto importante aquí es que, incluso con un motor hipotéticamente perfecto, hay un límite máximo en economía de combustible dictado por la conservación de la energía.

2. *El automóvil 25% eficiente, con todo lo demás igual, puede viajar un cuarto más que el automóvil ideal del inciso 1, o 20 km por litro de combustible. (Esto es 47 mi/gal, semejante a lo que los híbridos y otros vehículos eficientes de hoy en día ofrecen en la autopista.)*

VIDEO: Conservación de la energía:

ejemplo numérico

5Cuando estudies termodinámica en el Capítulo 18, aprenderás que un motor de combustión interna debe transformar parte de su energía del combustible en energía térmica. Por otra parte, una celda de combustible que impulse vehículos no tiene esta limitación.

C A PÍ T U LO 7 EN ERGÍ A

123

7.8 *Fuentes de energía*

La luz solar evapora el agua, que luego cae como lluvia; el agua de lluvia fluye hacia Observa la reducción de las redes

los ríos y hacia los depósitos detrás de las presas en donde se dirige hacia turbinas eléctricas de gran escala en la ac-generadoras. Luego regresa al mar, donde el ciclo continúa. El Sol es la fuente de prác-tualidad a medida que la energía

ticamente toda la energía (excepto la proveniente de las plantas nucleares). Incluso la solar local se extiende a edificios y

vehículos. Permanecerán las redes

energía que se obtiene del petróleo, el carbón, el gas natural y la madera originalmente locales más pequeñas en las áreas

provino del Sol. Eso se debe a que dichos combustibles se crearon mediante fotosín-urbanas densas. Tal vez las grandes

tesis: el proceso por el cual las plantas captan la energía solar y la almacenan como plantas eléctricas de todo tipo se

tejido vegetal. Un kilómetro cuadrado de luz solar a mediodía puede proporcionar un vuelvan cada vez menos comunes,

gigawatt de energía eléctrica, la misma producción de una gran planta de carbón o pero todavía se necesitarán cerca

nuclear. La energía solar es una industria verde en crecimiento.

de las fábricas u otras instalaciones

La Figura 7.22 muestra celdas fotovoltaicas en el Parque Solar Chattanooga de que sean grandes consumidoras de

electricidad. La mayor parte de las

Volkswagen®, en Tennessee, que contribuye a impulsar la producción de automóviles plantas laminadoras de acero ya

de dicha marca. En la actualidad, no sólo se trata de la mayor instalación solar de cual-funcionan eléctricamente.

quier fábrica para construir automóviles en Estados Unidos, sino también del arreglo fotovoltaico más grande de la Volkswagen® en todo el mundo.

FIGURA 7.22

¡Abundantes celdas solares en

Tennessee!

Tarde o temprano, toda la luz solar

Las celdas fotovoltaicas están ganando popularidad en los materiales para construc-que cae sobre la Tierra se irradiará

ción, fabricación de techos, mosaicos e incluso ventanas transparentes. En un inicio de vuelta al espacio. La energía de

las celdas fotovoltaicas eran obleas de cristal producidas de la misma manera en que se cualquier ecosistema siempre está

en tránsito: puedes rentarla, mas

fabrican los semiconductores para computadoras, o en la forma de delgados recubri-no poseerla.

mientos sobre vidrio o como refuerzo metálico. La tecnología más reciente sustituye los paneles compuestos de dichas celdas. Ahora se producen "hojas de energía" fotovoltaica ligeras y flexibles, mediante máquinas similares a prensas de impresión que enrollan tinta fotovoltaica en hojas de aproximadamente el grosor del papel de aluminio. Las hojas de energía pueden montarse casi donde sea y no necesitan estructuras resistentes.

La producción de energía solar no está confinada a la fotovoltaica. La luz solar Somos como campesinos arren-datarios que tumban la cerca de

puede reflejarse con espejos a calentadores llenos de agua encaramados en torres. La su casa para usarla como combus-concentración de la luz solar por miles de espejos puede calentar agua a más de cuatro tible cuando deberíamos usar las

veces su punto de ebullición normal, que entonces se convierte en vapor supercaliente inagotables fuentes de energía

para impulsar turbinas que generan electricidad. Aunque a veces se utilizan espejos pa-de la naturaleza: el Sol, el viento y

rabólicos en las plantas eléctricas térmicas solares, otras usan pequeños espejos planos, las mareas. Yo invertiría mi dinero

en el Sol y la energía solar. ¡Vaya

baratos y fáciles de instalar, cada uno aproximadamente del tamaño de una televisión fuente de energía! Espero que no

de pantalla grande. El rastreo computarizado mantiene a cada espejo enfocado en el tengamos que esperar hasta que

ángulo óptimo en el transcurso del día. Cuando el Sol no brilla, algunas instalaciones se agoten el petróleo y el carbón

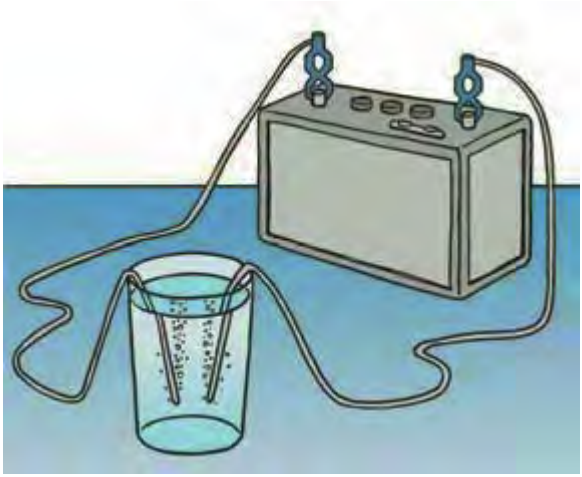
hacen funcionar las turbinas con gas natural. Además, la energía solar puede combi-antes de enfrentar esto.

narse con las plantas eléctricas tradicionales de combustible fósil para

aumentar su

— Thomas A. Edison

eficiencia. Ésta es hibridación solar. Prepárate para más hibridación de la energía solar.



Incluso el viento, causado por el desigual calentamiento de la superficie terrestre, es

+

–

una forma de energía solar. La energía del viento puede utilizarse para impulsar turbinas de generador dentro de molinos de viento especialmente equipados. La energía eólica depende mucho de la ubicación: hay que colocar turbinas donde el viento sople de manera estable y fuerte, y donde salven las objeciones de los residentes que no quieren que sus panoramas y su tranquilidad se alteren. Esto puede ser en el mar, lejos de las costas. Donde el agua no es muy profunda, las torres turbinas pueden anclarse al fondo marino. En aguas más profundas, las torres pueden montarse sobre plataformas flotantes. Como la energía solar, el viento produce una energía que no deja rastro alguno de carbono directo.

El hidrógeno es el menos contaminante de todos los combustibles. La mayor parte del hidrógeno en Estados Unidos se produce a partir de gas natural, donde altas ***F I G U R A 7 . 2 3***

temperaturas y presiones separan el hidrógeno de las moléculas de hidrocarburo.

Cuando la corriente eléctrica pasa a

Una desventaja de la separación del hidrógeno de los compuestos hidrocarburos es la través del agua conductora, se forman

inevitable producción de dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero. Un método burbujas de hidrógeno en un alambre

más sencillo y más limpio que no produce gases de efecto invernadero es la electrólisis: y burbujas de oxígeno en el otro. Esto

dividir eléctricamente el agua en sus partes constituyentes. La Figura 7.23 muestra es electrólisis. Una celda de combustible

hace lo opuesto: hidrógeno y oxígeno

cómo puedes realizar esto en un laboratorio o en casa. Coloca dos alambres de platino entran en la celda de combustible y se

que estén conectados a las terminales de una batería ordinaria en un vaso de agua (con combinan para producir electricidad y

un electrolito, como sal, disuelto en el agua para dar conductividad). Asegúrate de que agua.

los alambres no se toquen entre sí. Burbujas de hidrógeno se forman en un alambre, y burbujas de oxígeno se forman en el otro. Una celda de combustible es similar, pero opera a la inversa. Gases de hidrógeno y de oxígeno se comprimen en electrodos y se produce corriente eléctrica, junto con agua. La Estación Espacial Internacional utiliza celdas de combustible para satisfacer sus necesidades eléctricas al tiempo que produce agua potable para los astronautas. Aquí en la Tierra, los investigadores de celdas de Las celdas de combustible de

combustible crean celdas de combustible para autobuses, automóviles y trenes.

hidrógeno son dispositivos electro-

En China, una economía de hidrógeno ya comenzó con ferrocarriles impulsados por químicos que combinan el hidrógeno almacenado con el oxígeno

celdas de combustible. El hidrógeno necesario para las celdas de combustible puede pro-atmosférico para generar electrici-

ducirse por medios convencionales o con celdas solares. La energía solar puede extraer dad y vapor de agua. Los vehículos

hidrógeno del agua. Es importante saber que el hidrógeno no es una fuente de energía.

que operan con celdas de combusti-

Se necesita energía para producir hidrógeno (para extraerlo del agua y de los hidrocar-ble son vehículos con cero emi-

buros). Al igual que la electricidad, necesita una fuente de energía y es una forma de siones; no emiten CO directamente

2

(sino indirectamente, si la fuente de

almacenar y transportar dicha energía. De nuevo, para recalcarlo, el hidrógeno no es energía que produce el hidrógeno

una fuente de energía.

es de plantas de combustible fósil).

La energía de las olas oceánicas se explota en las costas de Portugal, donde el movimiento de pontones en la superficie del océano activa generadores sobre el fondo marino. De mayor interés es la energía de las olas oceánicas, otra fuente de energía limpia que actualmente se explota en varios lugares. En plantas ubicadas a lo largo de un estuario o en la bahía, la sobretensión de las olas oceánicas que suben y bajan activa turbinas que producen energía eléctrica, de un modo muy parecido a como el flujo de agua de las presas activa turbinas en las plantas hidroeléctricas.

El río Rance en Francia ha agitado energía eléctrica durante más de

40 años, como han hecho otros en Canadá y Rusia. Esta forma

de energía no es ni nuclear ni del Sol. Proviene de la energía rotacional del planeta. Espera más cantidad de plantas eléctricas de mareas

a mayor escala.

La fuente de energía útil más concentrada es la de los combus-

tibles nucleares: uranio, plutonio y, en un futuro, tal vez deuterio.

Por el mismo peso de combustible, las reacciones nucleares liberan

aproximadamente 1 millón de veces más energía que las reacciones

químicas o las alimenticias. A pesar de la catástrofe nuclear de Fu-

jiyama en 2011, cuando los problemas de seguridad y de almacena-

miento de los desechos radiactivos se resuelvan, debes estar atento a un interés renovado en esta forma de energía que no contamina la at-F I G U R A 7 . 2 4

En Bermudas, donde el agua fresca escasea, los techos se

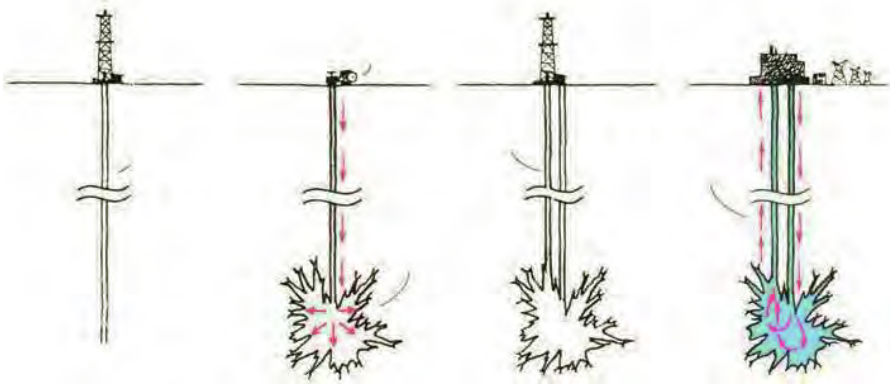
mósfera. Es muy interesante que el interior de la Tierra se mantenga

diseñan para captar agua, que se almacena en contenedores

caliente debido a la energía nuclear, que ha estado con la humanidad

para uso doméstico.

desde el tiempo cero.



C A PÍ T U LO 7 EN ERGÍ A

125

Un subproducto de la energía nuclear en el interior de la Tierra es la energía geotérmica. La energía geotérmica se mantiene en depósitos

subterráneos de roca caliente y agua caliente. La energía geotérmica relativamente cercana a la superficie está limitada de manera predominante a áreas de actividad volcánica, como Islandia, Nueva Zelanda, Japón y Hawái. En dichas ubicaciones, el agua caliente se aprovecha para proporcionar vapor e impulsar generadores eléctricos.

En otros lugares, hay otro método prometedor para producir electricidad. Se trata de la energía geotérmica de roca seca (Figura 7.26). Con este método, el agua se bombea al interior de una roca fracturada caliente muy por debajo de la superficie.

Cuando el agua se convierte en vapor, se envía por una tubería hacia una turbina en la superficie. Después de activar la turbina, ésta se bombea de vuelta hacia el suelo para reutilizarla. De esta forma, la electricidad se produce limpiamente.

A medida que aumenta la población mundial, también crece su necesidad de energía, en especial si se considera que la demanda per cápita también aumenta. Guiados por las leyes de la física, los tecnólogos en la actualidad investigan formas nuevas y más limpias para desarrollar fuentes de energía. Pero corren para estar a la delantera de una población mundial creciente y una mayor demanda en el mundo en desarrollo. Por desgracia, mientras el control de la población sea política y religiosamente incorrecto, la miseria humana se convierte en el cheque para el crecimiento poblacional sin restricciones. H. G. Wells escribió alguna vez (en El perfil de la historia): "la historia humana ***F I G U R A 7. 2 5***

se vuelve cada vez más una carrera entre educación y catástrofe".

Las celdas solares fotovoltaicas en más y

más techos (y los costados de las casas,

como éstas en Holanda) absorben la luz

solar y la convierten en energía eléctrica.

(a)

(b)

(c)

(d)

Planta eléctrica

Bomba

Primer

Segundo

hoyo

hoyo

Circulación

del agua

Fractura

hidráulica

F I G U R A 7 . 2 6

Energía geotérmica de roca seca. (a) Se cava un hoyo de varios kilómetros en granito seco.

(b) Se bombea agua en el interior del hoyo a alta presión y fractura la roca circundante para formar cavidades con mayor área superficial. (c) Un segundo hoyo se cava en las cercanías.

(d) El agua circula en sentido descendente por un hoyo y por la roca fracturada, donde se supercalienta, antes de ascender por el segundo hoyo. Después de impulsar una turbina, el agua vuelve a circular de nuevo en la roca caliente, lo que forma un ciclo cerrado.

CIENCIA BASURA

Los científicos tienen que estar abiertos a nuevas ideas. energía de la que se le pone? Eso es lo que ofrecen muchos Así es como crece la ciencia. Pero existe un cuerpo de

practicantes de la ciencia basura. Inversionistas ingenuos

conocimiento establecido que no puede derrumbarse

destinan su dinero a algunos de estos proyectos. Pero

con facilidad. En él se incluye la conservación de la energía,

ninguno de estos proyectos pasa la prueba de ser ciencia

que se teje en cada rama de la ciencia y se apoya en incontables

verdadera. Acaso algún día se descubra un error en la ley de

experimentos desde la escala atómica hasta la cósmica. Sin

conservación de la energía. Si eso sucede, los científicos se

embargo, ningún concepto ha inspirado más "ciencia basura"

regocijarán del descubrimiento. Pero mientras tanto,

que la energía. ¿No sería maravilloso si pudieras obtener energía

la conservación de la energía es tan sólida como cualquier

sin costo, de la nada, o poseer una máquina que produjera más

conocimiento que se tiene. No apuestes contra ella.

PA R T E U N O

M EC Á N I C A

R E S U M E N D E T É R M I N O S *(C O N O C I M I E N T O)*
Trabajo. *El producto de la fuerza y la distancia movida por la* ***Teorema trabajo-energía.*** *El trabajo realizado sobre un objeto fuerza:*

es igual al cambio en la energía cinética del objeto:

W 5 Fd

Trabajo 5 DEC

(De manera más general, el trabajo es el componente de

(El trabajo también puede transferir otras formas de

la fuerza en la dirección de movimiento por la distancia

energía a un sistema.)

movida.)

Ley de conservación de la energía. *La energía no se puede*

Potencia. *Tasa de tiempo del trabajo:*

crear ni destruir; se puede transformar de una forma en

otra, pero la cantidad total de energía nunca cambia.

trabajo realizado

Potencia =

Máquina. *Dispositivo, como una palanca o una polea, que*

intervalo de tiempo

aumenta (o reduce) una fuerza o simplemente cambia la

(De manera más general, la potencia es la tasa a la que se

dirección de una fuerza.

gasta energía.)

Conservación de energía. *La salida de trabajo de cualquier má -*

Energía. *Propiedad de un sistema que le permite realizar trabajo.*

quina no puede superar la entrada de trabajo. En una máquina

Energía mecánica. *Energía debida a la posición de algo o del ideal, donde ninguna energía se transforma en energía térmi-movimiento de algo.*

ca, trabajoentrada = trabajosalida; (Fd)entrada = (Fd)salida.

Energía potencial. *Energía que algo posee debido a su posición.*

Palanca. *Máquina simple que consiste en una barra rígida*

pivoteada en un punto fijo llamado fulcro.

Energía cinética. *Energía que algo posee debido a su*

movimiento, cuantificada por la relación:

Eficiencia. *Porcentaje del trabajo puesto en una máquina que se convierte en salida de trabajo útil. (De manera más*

Energía cinética = 1

2

mv

general, salida de energía útil dividida entre la entrada de

2

energía total.)

***P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S** (C O M P R E N S I Ó N)*

7.1 Trabajo

9. ¿Cuándo es significativa la energía potencial de algo?

1. ¿Cuándo es más evidente la energía?

7.3 Energía cinética

2. Una fuerza pone en movimiento un objeto. Cuando la

fuerza se multiplica por el tiempo de su aplicación, a

10. Cuando la rapidez de un automóvil en movimiento se

la cantidad se le llama impulso, y un impulso cambia la

duplica, ¿cuánta más energía cinética tiene?

cantidad de movimiento de dicho objeto. ¿Cómo se llama a

7.4 Teorema trabajo-energía

la cantidad fuerza 3 distancia?

11. Comparado con un automóvil que se mueve con cierta

3. Cita un ejemplo en el que una fuerza se ejerza sobre un

rapidez original, ¿cuánto trabajo deben suministrar los

objeto sin realizar trabajo sobre el objeto.

frenos de un automóvil para detener un automóvil que

4. ¿Cuál exige más trabajo: levantar un costal de 50 kg una

se mueve el doble de rápido? ¿Cómo se comparará la

distancia vertical de 2 m o levantar un costal de 25 kg

distancia de frenado?

una distancia vertical de 4 m?

12. Si empujas una caja horizontalmente con 100 N por el

5. ¿Exactamente qué es lo que permite que un objeto realice

suelo de una fábrica de 10 m y la fricción entre la caja y el

trabajo?

suelo son 70 N constantes, ¿cuánta energía cinética gana

6. Si los dos costales de la pregunta 4 se levantan sus

la caja?

respectivas distancias en el mismo tiempo, ¿cómo se

13. ¿De qué manera la rapidez afecta la fricción entre un

compara la potencia requerida para cada uno? ¿Y qué hay

camino y una llanta que derrapa?

del caso en el que el costal más ligero recorre su distancia

en la mitad del tiempo?

7.5 Conservación de energía

14. ¿Cuál será la energía cinética del pistón de un martinete

7.2 Energía potencial

que parte del reposo y experimenta una reducción de

7. Un automóvil se eleva cierta distancia en el elevador

10 kJ en energía potencial?

de una estación de servicio y, por tanto, tiene energía

15. Una manzana que cuelga de una rama tiene una energía

potencial respecto del suelo. Si se eleva el doble de alto,

potencial debido a su altura. Si cae, ¿en qué se convierte

¿cuánta más energía potencial tendría?

esta energía justo antes de golpear el suelo? ¿Y cuando

8. Dos automóviles se elevan a la misma altura en elevadores de

golpea el suelo?

una estación de servicio. Si un automóvil es el doble de masivo

que el otro, compara sus ganancias en energía potencial.

16. ¿Cuál es la fuente de energía en la luz solar?

7.7 Eficiencia

17. ¿Qué es la energía reciclada?

21. ¿Cuál es la eficiencia de una máquina que milagrosamente

convierte toda la energía de entrada en energía de salida útil?

7.6 Máquinas

22. Si una entrada de 100 J en un sistema de poleas aumenta

18. ¿Una máquina puede multiplicar la fuerza de entrada?

la energía potencial de una carga en 60 J, ¿cuál es la

¿La distancia de entrada? ¿La energía de entrada? (Si

eficiencia del sistema?

tus tres respuestas son iguales, busca ayuda; la última

pregunta es especialmente importante.)

7.8 Fuentes de energía

19. Si una máquina multiplica la fuerza por un factor de 4,

23. ¿Cuál es la fuente última de energía en los combustibles

¿qué otra cantidad disminuye y en cuánto?

fósiles, presas y molinos de viento?

20. Una fuerza de 50 N se aplica al extremo de una palanca, que

24. ¿Cuál es la fuente última de energía geotérmica?

se mueve cierta distancia. Si el otro extremo de la palanca se

25. ¿Puedes decir correctamente que el hidrógeno es una

mueve un tercio de la distancia, ¿cuánta fuerza puede ejercer?

nueva fuente de energía? ¿Por qué sí o por qué no?

P I E N S A Y R E A L I Z A *(A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 26. Coloca un poco de arena seca en una lata que tenga tapa.*

Compara la temperatura de la arena antes y después de

que agitas vigorosamente la lata durante más o menos un

minuto. Predice qué ocurrirá. ¿Cuál es tu explicación?

27. Haz lo mismo que el instructor de física Fred Cauthen y

coloca una pelota de tenis cerca y por arriba de la parte

superior de un balón de básquetbol. Suelta las pelotas

juntas. Si su alineación vertical permanece constante

mientras caen hacia el suelo, verás que la pelota de tenis

rebota inusualmente alto. ¿Puedes reconciliar esto con la

conservación de la energía?

S U S T I T U Y E Y L I S T O *(F A M I L I A R I Z A C I Ó N C O N E C U A C I O N E S)* ***Trabajo*** *5* ***fuerza*** *3* ***distancia: W*** *5* ***Fd***

es de 50,000 J. (Puedes expresar g en unidades de N/kg,

28. Calcula el trabajo realizado cuando una fuerza de 5 N

porque m/s2 es equivalente a N/kg.)

mueve un libro 1.2 m. (Recuerda que 1 N?m 5 1 J.)

1

2

1

2

29. Demuestra que, cuando una fuerza de 2.0 N mueve un

EEnneerrggííaa cciinnéétttiiccaa = m

maassaa × rraappiiddeezz : EEC

C = m

mvv

libro 1.2 m, se realizan 2.4 J de trabajo.

2

2

30. Calcula el trabajo realizado cuando una fuerza de 20 N

36. Demuestra que la energía cinética de un libro de 1 kg

empuja un carro 3.5 m.

lanzado a través de la habitación con una rapidez de

31. Calcula el trabajo realizado para levantar una barra de 500 N

3.0 m/s es 4.5 J. (1 J es equivalente a 1 kg?m/s2.)

a 2.2 m sobre el suelo. (¿Cuál es la ganancia de energía

37. Calcula la energía cinética de una motoneta de 84 kg que

potencial de la barra cuando se levanta a esta altura?)

se mueve a 10 m/s.

Teorema trabajo-energía: Trabajo

Potencia

5 DEC

5 ***trabajo/tiempo: P*** *5* ***W/ t***

38. Demuestra que, cuando un bloque de hielo de 3.0 kg se

32. Demuestra que, para darle a un ladrillo 100 J de EP en

mueve desde el reposo hasta una rapidez de 4.0 m/s, se

un tiempo de 2 s, se necesitan 50 W de potencia.

realiza un trabajo de 24 J.

33. Demuestra que, cuando una barra de 500 N se eleva

39. Demuestra que, para un avión que se mueve 500 m durante

2.2 m sobre el suelo en 1.4 s, se gastan aproximadamente

el despegue, impulsado por una fuerza de 5,000 N, ocurre

786 W de potencia.

un cambio en energía cinética de 2,500,000 J.

Energía potencial gravitacional** 5 **peso** 3 **altura:

ssaalliiddaa ddee eenneerrggíiaa úúttiill

EP** 5 **mgh

EEffiicciieennccciiaa = eennttrraaddaa ddee eenneerrggíiaa ttoottaall

34. Demuestra que, cuando un libro de 3.0 kg se eleva 2.0 m,

su aumento en energía potencial gravitacional es 60 J.

40. Demuestra que una máquina que tenga una entrada de

35. Demuestra que la energía potencial gravitacional de una

100 J y una salida de 40 J es 40% eficiente.

roca de 1,000 kg que se eleva 5 m sobre el nivel del suelo

128

PA R T E U

U N O

M EC Á N I C A

***P I E N S A Y R E S U E L V E** (A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 41. El segundo piso de una casa está 6 m arriba del nivel*

47. Al elevar un piano de 5,000 N con un sistema de poleas,

de la calle. ¿Cuánto trabajo se necesita para levantar un

los trabajadores observan que, por cada 2 m de soga

refrigerador de 300 kg al segundo piso?

jalados hacia abajo, el piano se eleva 0.2 m. Idealmente,

42. (a) ¿Cuánto trabajo se realiza cuando empujas una caja

demuestra que se necesitan 500 N para levantar el piano.

horizontalmente con 100 N por el suelo de 10 m de una

48. En la máquina hidráulica que se muestra, observas que,

fábrica? (b) Si la fuerza de fricción sobre la caja es de

cuando el pistón pequeño se empuja hacia abajo 10 cm,

70 N estables, demuestra que la EC ganada por la caja es

el pistón grande se eleva 1 cm. Si el pistón pequeño se

300 J. (c) Demuestra que 700 J se convierten en calor.

empuja hacia abajo con una fuerza de 100 N, ¿cuál es el

43. Esta pregunta es típica en algunos exámenes que

máximo peso que puede soportar el pistón grande?

se aplican para obtener la licencia de conducir: un

automóvil que se mueve a 50 km/h derrapa 15 m con los

?

frenos bloqueados. ¿Cuánto derrapará el automóvil con

los frenos bloqueados si se mueve a 150 km/h?

44. Berni Panzazo salta de un poste elevado hacia una alberca.

Su energía potencial en la parte superior es 10,000 J (en

relación con la superficie de la alberca). ¿Cuál es su energía

cinética cuando su energía potencial se reduce a 1,000 J?

45. Nellie Newton aplica una fuerza de 50 N al extremo de

49. ¿Cuántos watts de potencia gastas cuando ejerces una

una palanca, que se mueve cierta distancia. Si el otro

fuerza de 50 N que mueve una caja 8 m en un intervalo

extremo de la palanca se mueve un tercio de la distancia,

de tiempo de 4 s?

demuestra que la fuerza que ejerce es 150 N.

50. Emily sostiene una banana de masa m sobre el borde

46. Piensa en un sistema de poleas ideal. Si jalas un extremo

de un puente de altura h. Suelta la banana y cae al río.

de la soga 1 m hacia abajo con una fuerza de 50 N,

Mediante la conservación de energía demuestra que la

demuestra que puedes levantar una carga de 200 N un

rapidez de la banana justo antes de golpear el agua es

cuarto de metro de alto.

$v = 2gh$.

***PIENSA Y CLASIFICA** (ANÁLISIS)*

51. A continuación se muestran la masa y la rapidez de los

53. El carrito de montaña rusa que se muestra parte desde el

tres vehículos, A, B y C. Clasifícalos de mayor a menor

reposo en el punto A. Clasifica estas cantidades de mayor

para lo siguiente:

a menor en cada punto:

a. Cantidad de movimiento

a. Rapidez

b. Energía cinética

b. EC

c. Trabajo realizado para llevarlos a sus respectivas

c. EP

rapideces desde el reposo

2.0 m/s

8.0 m/s

A

1.0 m/s

E

A

B

C

C

B

D

800 kg

1,000 kg

90 kg

52. Una bola se suelta desde el reposo a la izquierda de la pista

54. Clasifica las lecturas del dinamómetro de mayor a menor.

metálica que se muestra. Supón que sólo tiene suficiente

(Ignora la fricción.)

fricción para rodar, mas no para reducir su rapidez.

Clasifica estas cantidades de mayor a menor en cada punto:

A

B

C

a. Cantidad de movimiento

b. EC

c. EP

?

?

?

A

B

D

C

C A PÍ T U LO 7 R E V ISI Ó N

129

P I E N S A Y E X P L I C A *(S Í N T E S I S)*

55. ¿Por qué es más fácil detener un camión ligeramente

70. ¿La Estación Espacial Internacional tiene EP gravitacio-

cargado que uno más pesado que tiene igual rapidez?

nal? ¿EC? Explica.

56. ¿Por qué no realizas trabajo sobre una mochila de 25 kg

71. ¿Qué dice el teorema trabajo-energía acerca de la rapidez

cuando caminas una distancia horizontal de 100 mm?

de un satélite en órbita circular?

57. Si tu amigo empuja una podadora cuatro veces más lejos

72. Un martillo en movimiento golpea un clavo y lo clava

que tú mientras ejerce solamente la mitad de la fuerza,

en una pared. Si el martillo golpea el clavo con el doble

¿cuál de ustedes realiza más trabajo? ¿Cuánto más?

de rapidez, ¿cuánto más profundo clavará al clavo? ¿Si lo

58. ¿Por qué uno se cansa cuando empuja contra una pared

golpea con tres veces la rapidez?

estacionaria cuando no se realiza ningún trabajo sobre la

73. ¿Por qué la fuerza de gravedad no funciona sobre

pared?

(a) una bola de boliche que rueda sobre una bolera y

59. ¿Cuál requiere más trabajo: estirar un resorte fuerte cierta

(b) un satélite en órbita circular alrededor de la Tierra?

distancia o estirar un resorte débil la misma distancia?

74. ¿Por qué la fuerza de gravedad funciona sobre un auto-

Defiende tu respuesta.

móvil que rueda por una colina mas no funciona cuando

60. Dos personas que pesan lo mismo suben un tramo de

rueda a lo largo de una parte a nivel del camino?

escaleras. La primera persona sube las escaleras en 30 s,

75. ¿La cuerda que sostiene la lenteja de un péndulo realiza

y la segunda persona, en 40 s. ¿Cuál persona realiza más

trabajo sobre la lenteja mientras se balancea de ida y vuelta?

trabajo? ¿Cuál usa más potencia?

¿La fuerza de gravedad hace algún trabajo sobre la lenteja?

61. Para determinar la energía potencial del arco tenso de Tenny

76. Una caja se jala por un suelo horizontal con una soga.

(Figura 7.10), ¿sería subestimar o sobrestimar el multiplicar

Al mismo tiempo, la caja jala de vuelta sobre la soga, de

la fuerza con la que sostiene la flecha en su posición tensa

acuerdo con la tercera ley de Newton. Entonces, ¿el trabajo

por la distancia que lo jala? ¿Por qué se dice que el trabajo

realizado sobre la caja por la soga es igual a cero? Explica.

realizado es fuerza promedio 3 distancia?

77. En un tobogán, un niño tiene energía potencial que dis-

62. Cuando un rifle con un barril largo se dispara,

minuye en 1,000 J mientras su energía cinética aumenta

la fuerza de los gases en expansión actúa sobre la bala

en 900 J. ¿Qué otra forma de energía se involucra y en

durante una distancia más larga. ¿Qué efecto tiene esto

qué cantidad?

sobre la velocidad de la bala que sale? (¿Ves por qué los

78. Alguien que quiere venderte una superbola afirma que

cañones de largo alcance tienen barriles tan largos?)

rebotará hasta una altura mayor que la altura de la cual se

63. Tu amigo dice que la energía cinética de un objeto

suelte. ¿Puede ocurrir esto?

depende del marco de referencia del observador. Explica

79. ¿Por qué una superbola, soltada desde el reposo, no puede

por qué estás de acuerdo o en desacuerdo.

alcanzar su altura original cuando rebota desde un suelo

64. Tú y un compañero de vuelo lanzan una bola de ida y

rígido?

vuelta en un avión en vuelo. ¿La EC de la bola depende

80. Considera una bola lanzada en línea recta hacia arriba

de la rapidez del avión? Explica cuidadosamente.

en el aire. ¿En qué posición su energía cinética está en un

65. Observas que tu amiga despega en un avión jet y

máximo? ¿Dónde está en un máximo su energía potencial

comentas acerca de la energía cinética que adquiere. Pero

gravitacional?

ella dice que no experimenta tal aumento en energía

81. Discute el diseño de la montaña rusa que se muestra en el

cinética. ¿Quién tiene la razón?

dibujo, en términos de la conservación de energía.

66. Cuando un jumbo jet frena y desciende a medida que se

?

aproxima al aterrizaje, hay una disminución tanto de su

energía cinética como de su energía potencial. ¿A dónde

va esta energía?

67. Explica cómo la "energía potencial elástica" cambió

82. Supón que tú y dos compañeros de clase discuten el dise-

drásticamente el deporte de salto con pértiga cuando

ño de una montaña rusa. Un compañero de clase dice
las pértigas flexibles de fibra de vidrio sustituyeron a las
que cada cima debe estar más abajo que la anterior. Tu
pértigas más rígidas de madera.
otro compañero dice que esto no tiene sentido, porque
68. ¿En qué punto en su movimiento, la EC de la lenteja de
siempre y cuando la primera sea la más alta, no importa
un péndulo está en un máximo? ¿En qué punto su EP
qué altura tengan las demás. ¿Tú qué opinas?
está en un máximo? Cuando su EC está a la mitad de su
83. Cuando la chica de la Figura 7.17 levanta con el gato
valor máximo, ¿cuánta EP tiene en relación con su EP en
hidráulico el automóvil, ¿cómo la aplicación de tan poca
el centro del balanceo?
fuerza puede producir suficiente fuerza para elevar el
69. Para demostrar la conservación de la energía,
automóvil?
un instructor de física suelta una pesada
84. ¿Qué famosa ecuación de Albert Einstein describe la rela-
lenteja de péndulo, como se muestra en el
ción entre masa y energía?
dibujo, lo que le permite balancearse de ida y
85. Cuando la masa de un objeto en movimiento se duplica sin
vuelta. ¿Qué sucedería si, en su entusiasmo, da a la lenteja

cambio en rapidez, ¿en qué factor cambió su cantidad de

un ligero empujón mientras abandona su nariz? Explica.

movimiento? ¿En qué factor cambió su energía cinética?

86. Cuando la velocidad de un objeto se duplica, ¿en qué

mangos largos y hojas cortas. Las cizallas tienen mangos

factor cambia su cantidad de movimiento? ¿En qué factor

muy largos y hojas muy cortas. ¿Por qué esto es así?

cambia su energía cinética?

94. Se dice que una máquina ineficiente "desperdicia energía".

87. ¿Cuál, si alguna, tiene mayor cantidad de movimiento:

¿Esto significa que la energía realmente se pierde? Explica.

una bola de 1 kg que se mueve a 2 m/s o una bola de 2 kg

95. Si un automóvil tuviera un motor 100% eficiente, y

que se mueve a 1 m/s? ¿Cuál tiene mayor energía cinética?

transfiriera toda la energía del combustible a trabajo, ¿el

88. Un automóvil tiene la misma energía cinética cuando viaja

motor estaría caliente al tacto? ¿Su escape calentaría el

hacia el norte que cuando da vuelta y viaja al sur. ¿La cantidad

aire circundante? ¿Haría algún ruido? ¿Vibraría? ¿Parte

de movimiento del automóvil es la misma en ambos casos?

de su combustible sería inútil?

89. Si la EC de un objeto es cero, ¿cuál es su cantidad de

96. Tu amigo dice que una forma de mejorar la calidad del

movimiento?

aire en una ciudad es hacer que los semáforos se sincro-

90. Si su cantidad de movimiento es cero, ¿su energía cinéti-

nicen de modo que los automovilistas puedan recorrer

ca necesariamente también es cero?

largas distancias con rapidez constante. ¿Qué principio

91. Si dos objetos tienen iguales energías cinéticas, ¿nece-

físico sustenta esta afirmación?

sariamente tienen la misma cantidad de movimiento?

97. La energía que necesitas para vivir proviene de la energía

Defiende tu respuesta.

potencial químicamente almacenada en los alimentos, que se

92. Dos trozos de arcilla con cantidades de movimiento

transforma en otras formas de energía durante el proceso

iguales y opuestas tienen una colisión frontal y llegan

de metabolismo. ¿Qué le ocurre a una persona cuya salida de

al reposo. ¿Se conserva su cantidad de movimiento? ¿Se

trabajo y calor combinados es menor que la energía consu-

conserva su energía cinética? ¿Por qué tus respuestas son

mida? ¿Qué ocurre cuando la salida de trabajo y calor de la

iguales o diferentes?

persona es mayor que la energía consumida? ¿Una persona

93. Las tijeras para cortar papel tienen hojas largas y mangos cortos, en tanto que las tijeras para cortar metal tienen cional? Defiende tus respuestas.

***PIENSA Y DISCUTE** (EVALUACIÓN)*

98. Discute si, una vez usada, la energía puede o no regenerarse. ¿Tu razonamiento es congruente con el término común energía renovable?

99. Discute qué tienen que ver la paz, la cooperación y la seguridad internacionales con la satisfacción de las necesidades energéticas del mundo.

103. El Sol produce el doble de energía solar en 2 horas de lo que hace en 1 hora. Pero la potencia solar del Sol es la misma de una hora a la siguiente. Distingue entre los términos energía solar y potencia solar.

104. Si una bola de golf y una bola de ping-pong se mueven con la misma energía cinética, ¿puedes decir cuál tiene mayor rapidez? Explica en términos de la definición de EC. De igual modo, en una mezcla gaseosa de moléculas pesadas y moléculas ligeras con la misma EC promedio, ¿cuál tendrá mayor rapidez? ¿Por qué esta pregunta es más fácil de responder

100. Considera las bolas idénticas soltadas desde el reposo sobre las pistas A y B, como se muestra. Cuando llegan a los extremos derechos de las pistas, ¿cuál tendrá mayor

¿puedes decir cuál tiene mayor rapidez?

que la similar (Piensa y discute 95) del Capítulo 3?

105. Operar el acondicionador de aire de un automóvil por lo general aumenta el consumo de combustible. Pero, a ciertas rapideces, un automóvil con sus ventanas abiertas

A

y con el acondicionador de aire apagado puede consumir

B

más combustible. Discute y explica.

101. ¿Un automóvil quema más gasolina cuando sus luces se encienden? ¿El consumo global de gasolina depende de si el motor opera o no mientras las luces están encendidas? Discute esto y defiende tu respuesta.

106. Discute por qué uno ni siquiera debería molestarse en usar una máquina si no puede multiplicar el trabajo de entrada para lograr mayor trabajo de salida. Entonces, ¿cuál es el uso de una máquina?

102. Supón que un objeto se pone a deslizar con una rapidez menor a la velocidad de escape sobre un plano infinito sin fricción en contacto con la superficie de la Tierra, como se muestra. Describe su movimiento. (¿Se deslizará

107. Tú le dices a un amigo que es imposible que una máquina produzca más energía de la que se le pone y tu amigo afirma que un reactor nuclear produce más energía de la

que se le pone. ¿Tú qué respondes?

por siempre con velocidad constante? ¿Se deslizará hasta

108. Ésta puede parecer una pregunta sencilla para que un

detenerse? ¿En qué forma sus cambios de energía serán

físico la responda: ¿con qué fuerza una roca que pesa

similares a los de un péndulo?)

10 N golpea el suelo si se le suelta desde una posición de

reposo a 10 m de altura? De hecho, la pregunta no puede

v

v

responderse a menos que tengas más información. Discu-

te por qué esto es así.

109. Tu compañero de discusión está confundido con las

ideas estudiadas en el Capítulo 4 que parecen contra-

decir las ideas estudiadas en este capítulo. Por ejemplo,

en el Capítulo 4, aprendiste que la fuerza neta es cero

118. Considera una lenteja unida a una cuerda, un péndulo

cuando un automóvil viaja por un camino a nivel con

simple, que se balancea de ida y vuelta. (a) ¿Por qué la

velocidad constante pero, en este capítulo, aprendiste

fuerza de tensión en la cuerda no realiza trabajo sobre el

que, en tal caso, se realiza trabajo. Tu compañero de dis-

péndulo? (b) Sin embargo, explica por qué la fuerza debida

cusión pregunta: "¿cómo puede realizarse trabajo cuando

a la gravedad sobre el péndulo casi en cada punto sí realiza

la fuerza neta es igual a cero?". Discute tu explicación.

trabajo sobre el péndulo. (c) ¿Cuál es la única posición del

110. En ausencia de resistencia del aire, una bola lanzada ver-

péndulo donde no ocurre "trabajo por la gravedad"?

ticalmente hacia arriba con cierta EC inicial regresará a

su nivel original con la misma EC. Cuando la resistencia

del aire es un factor que afecta la bola, ¿regresará a su

nivel original con la misma, menor o más EC? ¿Tu res-

puesta contradice la ley de conservación de la energía?

T

111. Estás en un techo y lanzas una bola al suelo y otra hacia

arriba. La segunda bola, después de elevarse, cae y tam-

bién golpea el suelo abajo. Si la resistencia del aire puede

despreciarse, y si sus rapideces iniciales descendente y

ascendente son las mismas, ¿cuál es la diferencia entre las

Fg

rapideces de las bolas al golpear el suelo? (Usa la idea de

conservación de la energía para llegar a tu respuesta.)

119. Considera un satélite en una órbita circular sobre la

112. En el sistema de poleas que se muestra,

superficie de la Tierra. En el Capítulo 10 aprenderás

el bloque A tiene una masa de 10 kg y

que la fuerza de la gravedad sólo cambia la dirección de

está suspendido precariamente en repo-

movimiento de un satélite en movimiento circular (y

so. Supón que las poleas y la cuerda no

lo mantiene en un círculo); NO cambia la rapidez del

tienen masa y que no hay fricción. Que

satélite. El trabajo realizado sobre el satélite por la fuerza

no haya fricción significa que la tensión

gravitacional es cero. ¿Cuál es tu explicación?

en una parte de la cuerda de sostén es la

A

misma en cualquiera otra parte. Discu-

B

120. Considera el aparato de bolas que se balancean (“cuna

te por qué la masa del bloque B es 20 kg.

de Newton"). Si dos bolas se elevan y se liberan, la can-

tidad de movimiento se conserva conforme dos bolas se

113. Al subir por la colina, el motor de gasolina de un auto-

disparan en el otro lado con la misma rapidez que las

móvil híbrido gasolina-eléctrico suministra 75 caballos

bolas soltadas al impacto. Pero la cantidad de movimien-

de fuerza mientras que la potencia total que lo impulsa

to también se conservaría si una bola se disparara con

es de 90 caballos de fuerza. Quemar gasolina proporciona

el doble de rapidez. Discute por qué esto nunca ocurre.

los 75 caballos de fuerza. Discute qué proporciona los

(Y explica por qué este ejercicio está en el Capítulo 7 en

otros 15 caballos de fuerza.

lugar de en el Capítulo 6.)

114. Cuando un conductor aplica los frenos para que un auto-

móvil que desciende por la colina se mantenga con rapi-

dez constante y con energía cinética constante, la energía

potencial del automóvil disminuye. ¿A dónde va esta

energía? Por el contrario, discute a dónde va la mayor

parte de ella con un vehículo híbrido.

115. ¿La EC de un automóvil cambia más cuando pasa de 10

a 20 km/h o cuando pasa de 20 a 30 km/h?

116. ¿Algo puede tener energía sin tener cantidad de movimien-

to? Explica. ¿Algo puede tener cantidad de movimiento sin tener energía? Discute y defiende tu respuesta.

117. La gravedad no realiza ningún trabajo sobre una bola de boliche que está en reposo o se mueve sobre una bolera porque la fuerza de la gravedad sobre la bola actúa perpendicular a la superficie. Pero sobre un plano inclinado, la fuerza de gravedad tiene un componente vectorial paralelo a la bolera, como en B. ¿De qué manera este componente explica (a) la aceleración de la bola y (b) el trabajo realizado sobre la bola para cambiar su energía cinética?

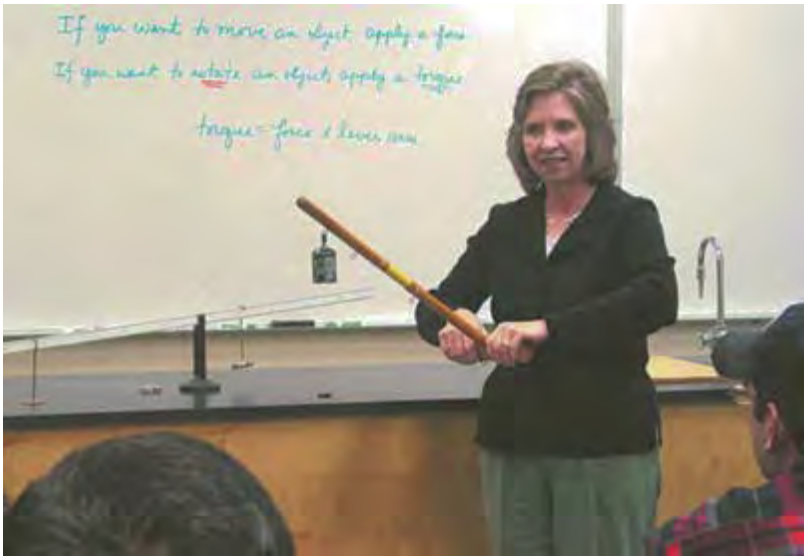
121. Para combatir los hábitos de desecho, con frecuencia se habla de "conservar la energía", con lo que se entiende apagar las luces y el agua caliente cuando no se usan y mantener los termostatos en un nivel moderado. En este capítulo también se habla de "conservación de la ener-

gía". Discute y distingue entre estas dos frases.

122. Cuando una compañía eléctrica no puede satisfacer la demanda de electricidad de sus clientes en un caluroso día de verano, ¿el problema debería llamarse "crisis energética" o "crisis de potencia"? Discute.

A

B


If you want to move an object apply a force
If you want to rotate an object apply a torque
torque = force x lever arm

8.1

Movimiento circular

8.2

Inercia rotacional

8.3

Momento de torsión

8.4

Centro de masa y centro de gravedad

4

8.5

Fuerza centrípeta

8.6

Fuerza centrífuga

8.7

Cantidad de movimiento angular

8.8

Conservación de la cantidad de movimiento

angular

5

1 *¿Desde qué distancia vertical sobre la parte superior del bucle, Paul Stokstad, fundador de Pasco, debe soltar el carro para lograr un movimiento de vuelta completa?* ***2*** *El futurista Jacque Fresco, el más apasionado profesor que he encontrado jamás, inspiró mi amor*

por la docencia. ***3*** *Mary Beth Monroe demuestra el uso de un*

"sensor de momento de torsión" antes de pasarlo entre sus estudian-

tes para que lo prueben. ***4*** *Diana Lininger Markham coloca un*

contenedor con agua abierto sobre el plato verde, ***5*** *que, cuando lo balancea en una trayectoria circular, ¡no se derrama! ¿Por qué?*

C A PÍ TC H

U L A P T

O 8 ER 8

M OV IRO

M I TA

ENT I O

O N

R A

O LT M

ACO

I T

O I O

N N

A L

13

Corea), conseguir una educación universitaria y seguir una carrera en ciencia.

El pensador futurista Jacque Fresco fue la influencia más destacada en mi transición de ser un pintor de carteles a seguir una vida en la física. Conocí a Fresco Jacque Fresco, con su socia, Roxanne Meadows, fun-por mi compañero en la pintura de carteles, Burl Grey, en daron The Venus Project y la organización no lucrativa Miami, Florida. Mi esposa y yo, junto con nuestro amigo Future by Design que refleja la culminación de la obra de caricaturista Ernie Brown, asistimos a las conferencias Fresco: la integración de lo mejor de la ciencia y la tecno-dinámicas semanales de Fresco en Miami Beach y a veces logía en un plan muy completo para una nueva sociedad en su casa de Coral Gables. El carismático Jacque siempre con base en intereses humanos y ambientales, una visión ha sido un visionario y tiene la global de esperanza por el futuro de la humanidad en convicción de que la mejor ruta la era tecnológica. Su visión está bien establecida en sus hacia un futuro mejor es por la muchos libros y publicaciones, en la web y en la película vía de la ciencia y la tecnología, Zeitgeist Addendum. Ahora, con más de 90 años de edad, y que probablemente una comu-

sigue inspirando a jóvenes y adultos en todo el mundo.

nidad con más ingenieros que

En sus conferencias típicas, Jacque abordaba las diferen-

abogados sea mejor. Sus temas cias entre ideas muy relacionadas, así como sus semejanzas.

giran en torno a la importancia

Recuerdo una de sus clases en la que señaló la diferencia

de la tecnología ampliada para entre el movimiento lineal y el movimiento rotacional. ¿En vivir mejor, local y globalmente.

qué lugar un niño se mueve más rápido en un tiovivo: cerca

En mi experiencia, Jacque fue y

de la pista exterior o cerca de la pista interior, o la rapidez es

es el mejor de los profesores, una enorme influencia en mi

la misma en ambos sitios? Debido a que la diferencia entre

propia enseñanza. Él me enseñó que, para introducir con-

rapidez lineal y rapidez rotacional no se comprende bien,

ceptos nuevos a los alumnos, primero hay que compararlos

Jacque señaló que plantear esta pregunta a diferentes per-

con ideas familiares: enseñar por analogía. Él sentía que

sonas genera distintas respuestas. Así como el "artillero de

poco o nada se aprendería si no se asociaba a algo similar,

cola" al final de una línea de patinadores que da una vuelta

familiar y ya comprendido. Tenía un "detector de tonte-

se mueve más rápido que los patinadores cerca del centro

rías" integrado que garantizaba que pondría el énfasis en

de la curva, del mismo modo las ruedas de un ferrocarril

las partes centrales de una idea. Sus estudiantes salían de

en el riel exterior de una curva viajan más rápido que las

cada conferencia con conocimiento valioso. La experiencia

ruedas en el riel interior. Jacque explicó cómo el leve gol-

me convenció de que debía aprovechar el proyecto de ley

peteo de los bordes de las ruedas hace esto posible. Esta y

GI (yo era un veterano no combatiente de la guerra de otras semejanzas y diferencias se abordan en este capítulo.

***8.1** Movimiento circular*

La rapidez lineal, que se denomina simplemente rapidez en capítulos anteriores, es la distancia recorrida por unidad de tiempo. Un punto en el borde exterior de un tiovivo o tornamesa recorre una mayor distancia en una rotación completa que un punto Cuando un objeto gira en torno a

más cerca del centro. Recorrer una mayor distancia en el mismo tiempo significa una un eje interno, el movimiento

mayor rapidez. La rapidez lineal es mayor en el borde exterior de un objeto en rotación es una rotación o giro. Un tiovivo,

que más cerca del eje. La rapidez lineal de algo que se mueve por una trayectoria circu-una tornamesa y la Tierra giran en

*lar puede llamarse **rapidez tangencial** porque la dirección de movimiento es tangente torno a un eje interno central. Sin*

a la circunferencia del círculo. Para el movimiento circular puedes usar los términos embargo, el término revolución, se

rapidez lineal y rapidez tangencial de manera indistinta. Las unidades de la rapidez refiere a un objeto que se mueve

lineal o tangencial por lo general son m/s o km/h.

en torno a un eje externo. La Tierra

revoluciona en torno al Sol una

*La **rapidez rotacional** (en ocasiones llamada rapidez angular) es el número de rota-vez cada año, en tanto que rota en*

ciones o revoluciones por unidad de tiempo. Todas las partes del tiovivo rígido y de la torno a su eje polar una vez al día.

tornamesa giran en torno al eje de rotación en la misma cantidad de tiempo. Por ende, todas las partes comparten la misma tasa de rotación, o el mismo número de rotaciones o revoluciones por unidad de tiempo. Es común expresar las tasas rotacionales en revoluciones por minuto (RPM).1 Por ejemplo, la mayoría de las tornamesas fonográficas, 1Los físicos por lo general describen la rapidez rotacional, ω, en términos del número de "radianes" girados en una unidad de tiempo. Hay un poco más de 6 radianes en una rotación completa (2π radianes, para ser exactos). Cuando se asigna una dirección a la rapidez rotacional, se le llama velocidad rotacional (con frecuencia llamada velocidad angular).

La velocidad rotacional es un vector cuya magnitud es la rapidez rotacional. Por convención, el vector de velocidad rotacional yace a lo largo del eje de rotación y apunta en la dirección de avance de un tornil o convencional de giro derecho.

134

PA R T E U N O

M EC Á N I C A

Rápido Doble de rápido

VIDEO: Rapidez rotacional

?

(a)

(b)

SCREENCAST: Movimiento

circular

F I G U R A 8 . 1

(a) Cuando la tornamesa gira, un punto más alejado del centro recorre una trayectoria más larga en el mismo tiempo y tiene mayor rapidez tangencial. (b) Una mariquita al doble de lejos del centro se mueve el doble de rápido.

Cuando una hilera de personas,

con los brazos entrelazados en la

que eran comunes en la época de mamá y papá, giran a 3313 RPM. Una mariquita pista de patinaje, hace un giro, el

sentada en cualquier parte sobre la superficie de la tornamesa gira a 3313 RPM.

movimiento del "artillero de cola"

La rapidez tangencial y la rapidez rotacional están relacionadas. ¿Alguna vez has es evidencia de una mayor rapidez

tangencial.

viajado en una gran plataforma giratoria redonda en un parque de diversiones? Mientras más rápido gira, mayor es tu rapidez tangencial. Esto tiene sentido; cuanto mayores sean las RPM, mayor será tu rapidez en metros por segundo. Se dice que la rapidez tangencial es directamente proporcional a la rapidez rotacional a cualquier distancia fija desde el eje de rotación.

La rapidez tangencial, a diferencia de la rapidez rotacional, depende de la distancia radial (la distancia desde el eje). En el centro mismo de la plataforma giratoria, no tienes rapidez tangencial en absoluto; simplemente giras. Pero, a medida que te aproximas al borde de la plataforma, descubres que te mueves cada vez más rápido.

La rapidez tangencial es directamente proporcional a la distancia respecto del eje para cualquier rapidez rotacional dada.

De modo que se ve que la rapidez tangencial es proporcional tanto a la distancia radial como a la rapidez rotacional:2

F I G U R A 8 . 2

Rapidez tangencial distancia radial 3 rapidez rotacional

La rapidez tangencial de cada persona

es proporcional a la rapidez rotacional

En forma simbólica,

de la plataforma multiplicada por la

v r

distancia respecto del eje central.

donde v es la rapidez tangencial y (letra griega omega minúscula) es la rapidez rotacional. Te mueves más rápido si la tasa de rotación aumenta (mayor). También te mueves más rápido si te alejas más del eje (mayor r). Aléjate el doble del eje rotacional en el centro y te mueves el doble de rápido. Aléjate tres veces y tienes tres veces más rapidez tangencial. Si te

encuentras en algún tipo de sistema giratorio, tu rapidez tangencial depende de cuán lejos estés del eje de rotación.

Cuando la rapidez tangencial experimenta un cambio, se habla de una aceleración tangencial. Cualquier cambio en la rapidez tangencial indica una aceleración paralela al ***SCREENCAST: Ruedas de ferrocarril***

movimiento tangencial. Por ejemplo, una persona sobre una plataforma giratoria que acelera o frena experimenta una aceleración tangencial. Pronto verás que cualquier cosa que se mueve en una trayectoria curva experimenta otro tipo de aceleración, una dirigida hacia el centro de curvatura. Ésta es aceleración centrípeta. Para no "sobrecargarte de información", no se entrará en detalles de la aceleración tangencial o centrípeta.

¿Por qué una persona con una

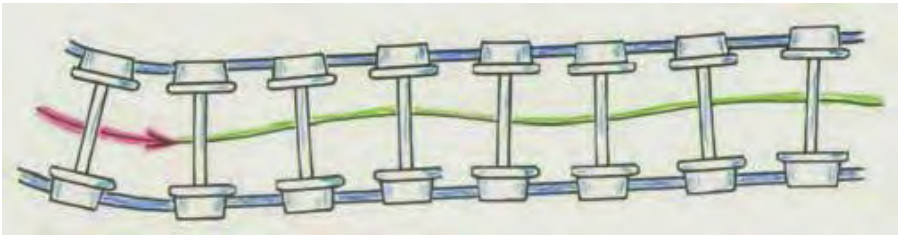
pierna más corta que la otra tiende

2

a caminar en círculos cuando se

Si tomas un curso avanzado de física, aprenderás que, cuando se usan las unidades adecuadas para la rapidez tangen-pierde?

cial v, la rapidez rotacional y la distancia radial r, la proporción directa de v tanto con r como con se convierte en la ecuación exacta v 5 r v. De modo que la rapidez tangencial será directamente proporcional a r cuando todas las partes de un sistema tengan simultáneamente la misma , para una rueda o un disco (¡o un matamoscas!).



C A PÍ T U LO 8 M OV I M I EN TO ROTACI O N A L

135

RUEDAS EN LOS FERROCARRILES

¿ Por qué un ferrocarril en movimiento permanece sobre las los pasajeros sienten los vaivenes del tren a medida que estas acciones vías? La mayoría de las personas supone que los flancos de las

correctivas tienen lugar.

ruedas impiden que las ruedas descarrilen. Pero, si observas

Esta forma inclinada es esencial en las curvas de las vías de

dichos flancos, probablemente notarás que están herrumbrosos.

ferrocarril. En cualquier curva, la distancia a lo largo de la parte

Rara vez tocan el riel, excepto cuando siguen las hendiduras que

exterior es más larga que la distancia a lo largo de la parte interior cambian al tren de un conjunto de vías a otro. Así que, ¿cómo es

(como en la Figura 8.1a). De modo que, siempre que un vehículo

que las ruedas de un tren permanecen en los rieles? Permanecen en

siga una curva, sus ruedas exteriores viajan más rápido que sus

los rieles porque sus bordes están ligeramente inclinados.

ruedas interiores. Para un automóvil, esto no es un problema porque

Si ruedas un vaso inclinado por una superficie, éste sigue una

las ruedas son libres y ruedan independientemente unas de otras.

trayectoria curva (Figura 8.3). La parte más ancha del vaso tiene

Sin embargo, un tren, como el par de vasos unidos, tiene pares de

un radio más grande, rueda mayor distancia por cada revolución y,

ruedas que se conectan firmemente y giran juntas. Ruedas opuestas

por tanto, tiene mayor rapidez tangencial que la parte angosta. Si

tienen las mismas RPM en cualquier momento. Pero, debido al

unes un par de vasos por sus extremos anchos (simplemente pégalos

borde ligeramente inclinado de la rueda, su rapidez tangencial a

con cinta) y ruedas el par a lo largo de un par de rieles paralelos,

lo largo del riel depende de si viaja en la parte angosta del borde o los vasos permanecerán sobre las vías y se centrarán siempre que

en la parte ancha. En la parte ancha, viaja más rápido. De modo

rueden fuera del centro (Figura 8.4). Esto ocurre porque, cuando

que, cuando un tren negocia una curva, las ruedas en el riel exterior el par rueda hacia la izquierda del centro, por decir, la parte ancha viajan en la parte más ancha de los bordes inclinados, en tanto que

del vaso izquierdo viaja sobre el riel izquierdo en tanto la parte

las ruedas opuestas viajan en sus partes angostas. De esta forma, las estrecha del vaso derecho viaja sobre el riel derecho. Esto dirige el ruedas tienen diferentes rapideces tangenciales para la misma rapidez par hacia el centro. Si el par se "excede" hacia la derecha, el proceso rotacional. ¡Esto es v r en acción! ¿Puedes ver que, si las ruedas se repite, esta vez hacia la izquierda, a medida que las ruedas tienden no estuvieran inclinadas, ocurrirían raspaduras y las ruedas chirriarían a centrarse ellas mismas. Lo mismo ocurre con un ferrocarril, donde

cuando un tren da la vuelta por una curva?

F I G U R A 8 . 3

Puesto que la parte

ancha del vaso rueda

más rápido que la parte

La parte angosta de la rueda izquierda va más lento,

angosta, el vaso rueda en

de modo que las ruedas curvan a la izquierda

una curva.

La parte ancha de la rueda izquierda va más rápido,

de modo que las ruedas curvan a la derecha

F I G U R A 8 . 6

(Arriba) A lo largo de una vía que se curva hacia la izquierda, la rueda derecha viaja en su parte ancha y va más rápido, en tanto que la rueda izquierda viaja sobre su parte angosta y va más lento.

F I G U R A 8 . 4

(Abajo) Lo opuesto es cierto cuando la vía se curva a la derecha. Dos vasos unidos permanecen sobre las vías mientras ruedan porque, cuando se salen del centro, las diferentes rapideces tangenciales debidas a la inclinación hacen que se autocorrijan hacia el centro de la vía.

F I G U R A 8 . 5

Las ruedas de un

ferrocarril están

ligeramente inclina-

F I G U R A 8 . 7

das (aquí se muestran

Después de negociar una curva, un tren con frecuencia oscila

exageradas).

en la parte recta conforme las ruedas se autocorrigen.

P U N T O D E C O N T R O L

1. Imagina una mariquita sentada a la mitad entre el eje de rotación y el borde exterior de la tornamesa de la Figura 8.1b. Cuando la tornamesa tiene una rapidez rotacional de 20 RPM y el bicho tiene una rapidez tangencial de 2 cm/s, ¿cuáles serán las rapideces rotacional y tangencial de su amiga que se sienta en el borde exterior?

2. Los trenes viajan sobre un par de rieles. Para el movimiento en línea recta, ambos rieles tienen la misma longitud. Sin embargo, esto no es así para los rieles que corren por una curva. ¿Cuál riel es más largo: el que está en el exterior de la curva o el que está en el interior?

F I G U R A 8 . 8

Cathy Candler pregunta a sus alum-

nos cuál conjunto de vasos se autoco-

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

rregirá cuando los ponga a rodar a lo

1. *Dado que todas las partes de la tornamesa tienen la misma rapidez rotacional, su largo de un par de "rieles métricos".*

amiga también gira a 20 RPM. La rapidez tangencial es otra historia: dado que la amiga está al doble de distancia del eje de rotación, se mueve el doble de rápido, 4 cm/s.

2. *Igual que en la Figura 8.1a, el riel en el exterior de la curva es más largo, de la mis-Una idea que se planteó en años*

ma manera como la circunferencia de un círculo de mayor radio es más larga.

pasados para aumentar la eficiencia

de los viajes en rieles eléctricos fue

la de los discos masivos de fricción

8.2

(volantes de inercia) debajo del

Inercia rotacional

suelo de los vagones de ferrocarril.

Así como un objeto en reposo tiende a permanecer en reposo y un objeto en movi-Cuando se aplicaran los frenos, en

miento tiende a permanecer en movimiento en una línea recta, un objeto que gira en lugar de frenar los vagones mediante la conversión de la energía

torno a un eje tiende a permanecer girando en torno al mismo eje a menos que alguna de frenado en calor por vía de la

influencia externa interfiera en él. (Dentro de poco verás que esta influencia externa fricción, la energía de frenado se

se llama correctamente momento de torsión.) La propiedad de un objeto de resistir los destinaría a hacer girar los volantes

cambios en su estado de movimiento rotacional se llama ***inercia rotacional.****3 Los cuer-de inercia, que entonces podrían*

pos que giran tienden a permanecer en rotación, en tanto que los cuerpos que no giran poner en marcha generadores que

tienden a permanecer sin rotación. En ausencia de influencias externas, un trompo en suministraran energía eléctrica para

hacer funcionar el tren. El carácter

rotación sigue girando, en tanto que un trompo en reposo permanece en reposo.

masivo de los discos de fricción

Al igual que la inercia para el movimiento lineal, la inercia rotacional depende de la resultó impráctico, pero la idea no

masa. El grueso disco de piedra que gira debajo de una rueda de alfarero es muy masi-se perdió. Los automóviles híbridos

vo y, una vez que gira, tiende a permanecer girando. Pero, a diferencia del movimiento de hoy hacen en gran parte lo mis-lineal, la inercia rotacional depende de la distribución de la masa en torno al eje de mo, no de manera mecánica, sino

rotación. Cuanto mayor sea la distancia entre la concentración de masa de un objeto eléctrica. La energía de frenado se

desvía hacia baterías eléctricas, que

y el eje, mayor será la inercia rotacional. Esto es evidente en los volantes de inercia luego se utilizan para hacer funcio-industriales que se construyen de modo que la mayor parte de su masa se concentre nar al automóvil.

lejos del eje, a lo largo del borde. Una vez en rotación, tienen una mayor tendencia a permanecer en rotación. Cuando están en reposo, es más difícil ponerlos en rotación.

Los volantes de inercia industriales constituyen un medio práctico de almacenamiento de energía en las centrales eléctricas. Cuando las plantas generan electricidad de manera continua, la energía que no se necesita cuando la demanda de electricidad es baja se desvía hacia volantes masivos, que son la contraparte de las baterías eléctricas, pero inocuos para el ambiente, sin metales tóxicos ni desechos peligrosos. Luego las Fácil de rotar

ruedas giratorias se conectan a generadores que liberan la energía cuando se necesita.

Cuando los volantes de inercia se combinan en bancos de 10 o más conectados a las redes eléctricas, compensan las fluctuaciones entre oferta y demanda y operan con más suavidad. ¡Viva la inercia rotacional!

Mientras mayor sea la inercia rotacional de un objeto, mayor es la dificultad para cambiar su estado de rotación. Este hecho lo aprovecha un funámbulo de circo que Difícil de rotar

lleva una larga pértiga para ayudarse a mantener el equilibrio. Mucha de la masa de la ***F I G U R A 8 . 9***

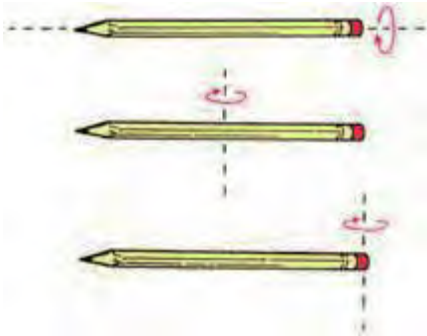
pértiga está lejos del eje de rotación, su punto medio. Por tanto, la pértiga tiene bas-La inercia rotacional depende de la

tante inercia rotacional. Si el funámbulo comienza a trastabillar, un firme apretón a la distribución de la masa en relación con

3

el eje de rotación.

Con frecuencia llamada momento de inercia.



pértiga la hace girar. Pero la inercia rotacional de la pértiga resiste, lo que

da al funámbulo tiempo para reajustar su equilibrio. Cuan-Inercia rotacional

to más larga sea la pértiga, mejor para el equilibrio. Y mejor aún

suspiro

si en los extremos se colocan objetos masivos. Pero un funámbulo

sin pértiga al menos puede extender los brazos para aumentar la

inercia rotacional del cuerpo.

La inercia rotacional de la pértiga, o de cualquier objeto, de-

pende del eje en torno al cual gire.4 Compara las diferentes rota-

ciones de un lápiz en la Figura 8.11. Considera tres ejes: uno en

torno a su núcleo central paralelo a la longitud del lápiz, donde

está el grafito; el segundo en torno al eje perpendicular del punto ***F I G U R A 8 .1 0***

medio, y el tercero en torno a un eje perpendicular respecto de La tendencia de la pértiga a resistir la rotación ayuda al funámbulo.

un extremo. La inercia rotacional es muy pequeña en torno a la

primera posición (en torno al grafito); es fácil girar el lápiz entre las puntas de tus dedos porque casi toda la masa está muy cerca del eje. En torno al segundo eje, como el que usa el funámbulo de la ilustración anterior, la inercia rotacional es mayor. En torno al tercer eje, en el extremo del lápiz de modo que se balancee como un péndulo, la inercia rotacional es todavía mayor.

Un bate de béisbol largo sostenido cerca de su extremo angosto tiene más inercia rotacional que un bate corto. Una vez que se balancea el bate largo, tiene mayor tendencia a seguir balanceándose, pero es más difícil que adquiera rapidez. Un bate corto, con menos inercia rotacional, es más fácil de balancear, lo que explica por qué los jugadores de béisbol en ocasiones "estrangulan" un bate al asirlo más cerca del extremo ***F I G U R A 8 .11***

más masivo. De igual modo, cuando doblas las piernas para correr, reduces su inercia El lápiz tiene diferentes inercias rota-rotacional de modo que puedes girarlas de ida y vuelta más rápidamente. Una persona cionales en

torno a diferentes ejes de rotación.

de piernas largas tiende a caminar con zancadas más lentas que una persona con piernas cortas. La diferencia en las zancadas de criaturas con distintas longitudes de patas es muy evidente en los animales. Jirafas, caballos y avestruces corren con pasos más lentos que los perros salchicha, los ratones y los bichos.

Debido a la inercia rotacional, un cilindro sólido que parte del reposo rodará por un plano inclinado más rápido que un aro. Ambos giran en torno a un eje central, y es el aro el que tiene la forma con la mayor parte de su masa lejos de su eje. De modo que, por su peso, un aro tiene mayor inercia rotacional y es más difícil de echar a rodar.

Cualquier cilindro sólido superará en rodamiento a cualquier aro sobre el mismo plano ***F I G U R A 8 . 1 2***

Cuando corres, doblas las piernas para

reducir la inercia rotacional.

VIDEO: Inercia rotacional cuando

se usan tubos con pesos

F I G U R A 8 . 1 3

Las patas cortas tienen menos inercia

rotacional que las patas largas. Un

animal con patas cortas tiene una

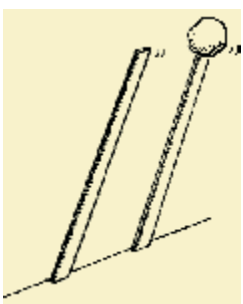
zancada más rápida que las personas con

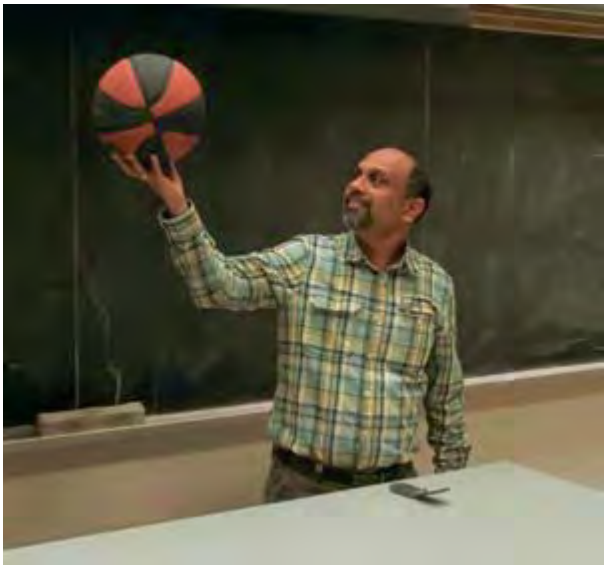
piernas largas, tal como un bateador de

béisbol puede abanicar un bate corto

más rápidamente que uno largo.

4Cuando la masa de un objeto está concentrada en el radio r respecto del eje de rotación (como en el caso de una lenteja de péndulo simple o un anillo delgado), la inercia rotacional I es igual a la masa m multiplicada por el cuadrado de la distancia radial. Para este caso especial, I 5 mr 2.





v

inclinado. Esto no parece factible al principio, pero recuerda que cualesquiera dos v

objetos, sin importar la masa, caerán juntos cuando se suelten. También se deslizarán juntos cuando se suelten sobre un plano inclinado. Cuando se introduce la rotación, el objeto con mayor inercia rotacional en relación con su propia masa tiene la mayor resistencia a un cambio de movimiento. Por tanto, cualquier cilindro sólido rodará ***F I G U R A 8 . 1 4***

por cualquier plano inclinado con mayor aceleración que cualquier cilindro hueco, sin Un cilindro sólido rueda hacia abajo

importar la masa o el radio. Un cilindro hueco tiene más "pereza por unidad de masa"

por un plano inclinado más rápido

que un cilindro sólido. ¡Inténtalo y verás!

que un aro, ya sea que tengan o no la

En la Figura 8.15 se comparan las inercias rotacionales de objetos con formas y ejes misma masa o diámetro exterior. Un

aro tiene mayor inercia rotacional en

variados. No es importante que aprendas las ecuaciones que se muestran en la figura, relación con su masa que un cilindro.

¿pero puedes ver cómo varían con la forma y el eje?

F I G U R A 8 . 1 5

Péndulo

Inercias rotacionales de varios objetos,

Aro en torno a eje normal Aro en torno a un diámetro

cada uno de masa m, en torno a los ejes

simple

indicados.

r

r

r

$I = mr2$

$I = mr2$

$I = mr$

1

2

2

VIDEO: Inercia rotacional cuando

Barra en torno a

Cilindro

Esfera sólida

se usa un martillo

un extremo

Barra en torno a CG

sólido

en torno a CG

r

L

r

$I = mr$

1

2

2

$I = mL$

1

2

12

$I = mr$

2

2

5

$I = mL$

1

2

3

P U N T O D E C O N T R O L

1. Imagina que balanceas un martillo en posición vertical sobre la punta de tu dedo. Seguramente la cabeza es más pesada que el mango. ¿Es más fácil equilibrarlo con el extremo del mango en la punta de tu dedo, de modo que

F I G U R A 8 . 1 6

la cabeza esté arriba, o al revés?

Sanjay Rebello agrega a la Figura 8.15

2. Piensa en un par de reglas de un metro casi rectas contra la

la inercia rotacional I 5 ⅔ mr 2 para una

pared. Si las sueltas, girarán hacia el suelo al mismo tiempo.

esfera hueca con pared delgada.

¿Pero si una tiene un trozo masivo de arcilla pegado en el

extremo superior? ¿Girará hacia el suelo en un tiempo más

largo o más corto?

3. Sólo por diversión, y dado que se están estudiando cosas

VIDEO: Inercia rotacional con una

redondas, ¿por qué las tapas de las alcantarillas tienen forma circular?

barra con pesos

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Sostén el martillo con el mango en la punta de tu dedo y la cabeza arriba. ¿Por qué? Porque de esta forma tendrá más inercia rotacional y será más resistente a un cambio rotacional. (Inténtalo tú mismo; trata de equilibrar una cuchara de Observa cómo la inercia rotacional*

ambas formas sobre la punta de tu dedo.) Los acróbatas que equilibran una larga depende muchísimo de la posición

pértiga vertical tienen una labor más sencilla cuando sus amigos están en la parte del eje de rotación. Una barra que

superior de la pértiga. ¡Una pértiga vacía en la parte superior tiene menos inercia gira en torno a un extremo, por

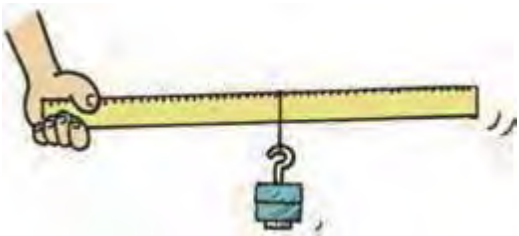
rotacional y es más difícil de equilibrar!

ejemplo, tiene cuatro veces más

inercia rotacional que una barra

2. *¡Inténtalo y ve! (Si no tienes arcilla, piensa en algo parecido.) que gira en torno a su centro.*

3. *No te vayas tan rápido con esta pregunta. Piénsalo un poco. Si no encuentras la respuesta, entonces busca la respuesta al final del capítulo.*



C A PÍ T U LO 8 M OV I M I EN TO ROTACI O N A L

139

8.3 *Momento de torsión*

Sostén con la mano el extremo de un metro en sentido horizontal. Cuelga un peso de él cerca de tu mano y podrás sentir que la barra gira. Ahora desliza el peso más lejos de tu mano y podrás sentir más giro, aun cuando el peso sea el mismo. La fuerza que actúa sobre tu mano es la misma. Lo que cambia es el momento de torsión.

Momento de torsión (también llamado torca o momento de fuerza) es la contraparte rotacional de la fuerza. Las fuerzas tienden a cambiar el movimiento de las cosas; los momentos de torsión tienden a girar o cambiar el movimiento rotacional de las cosas.

Si quieres que un objeto estacionario se mueva o que un objeto en movimiento cambie su velocidad, aplica una fuerza. Si quieres que un objeto estacionario gire o que un objeto en rotación cambie su velocidad rotacional, aplica un momento de torsión.

Así como la inercia rotacional difiere de la inercia regular, el momento de torsión ***F I G U R A 8 .17***

difiere de la fuerza. Tanto la inercia rotacional como el momento de torsión tienen que Aleja el peso de tu mano y siente la ver con la distancia respecto del eje de rotación. En el caso del momento de torsión, diferencia entre fuerza y momento de esta distancia, que proporciona apalancamiento, se llama brazo de palanca. Es la dis- torsión.

tancia más corta entre la fuerza aplicada y el eje de rotación. El ***momento de torsión*** *se define como el producto de este brazo de palanca y la fuerza que tiende a producir rotación:*

Momento de torsión brazo de palanca fuerza

3 m

1.5 m

Los momentos de torsión son intuitivamente familiares para los niños pequeños que juegan en un subibaja. Los niños pueden equilibrar un subibaja aun cuando sus pesos sean distintos. Al considerar únicamente al peso, éste no produce rotación (tampoco el momento de torsión) y los niños aprenden pronto que la distancia a la que se 250 N

sientan respecto del punto pivote es tan importante como sus pesos. El momento de torsión producido por el niño que está a la derecha en la Figura 8.18 tiende a producir 500 N

rotación en el sentido de las manecillas del reloj, en tanto que el momento de torsión ***F I G U R A 8 .1 8***

producido por la niña a la izquierda tiende a producir rotación contra las manecillas No se produce rotación cuando los mo -

del reloj. Si los momentos de torsión son iguales, y esto hace que el momento de torsión mentos de torsión se equilibran entre sí.

neto sea cero, no se produce rotación.

Supón que el subibaja se configura de modo que la niña con la mitad de peso se suspende de una soga de 4 m que cuelga de su extremo del subibaja (Figura 8.19). Ahora ella está a 5 m del fulcro, y el subibaja sigue equilibrado. Se observa que la distancia del brazo de palanca todavía es de 3 m y no de 5 m. El brazo de palanca en torno a cualquier eje de rotación es la distancia perpendicular desde el eje hasta la línea a lo 3 m

largo de la cual actúa la fuerza. Ésta siempre será la distancia más corta entre el eje de rotación y la línea a lo largo de la cual actúa la fuerza.

Es por esto que es más probable que el terco tornillo que se muestra en la Figura 8.20

4 m

5 m

gire cuando la fuerza aplicada sea perpendicular a la llave, que cuando esté a un ángulo oblicuo como se muestra en la primera figura. En la primera figura, el brazo de palanca se muestra con la línea punteada y es más corto que la longitud del mango de la llave.

En la segunda figura, el brazo de palanca tiene la misma longitud que el mango de la llave. En la tercera figura, el brazo de palanca se extiende con un pedazo de tubo para proporcionar más apalancamiento y un mayor momento de torsión.

F I G U R A 8 . 1 9

El brazo de palanca todavía es 3 m.

Momento

Fuerza

Fuerza

Fuerza

de torsión

Más momento

Todavía más

de torsión

momento de torsión

90°

90°

Brazo

Brazo de palanca

Brazo de palanca

de palanca

FIGURA 8.20

Aunque las magnitudes de las fuerzas son iguales en cada caso, los momentos de torsión son diferentes.

SCREENCAST: Momento de torsión

M E C Á N I C A

Recuerda la regla de equilibrio del Capítulo 2: que la suma de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo o cualquier sistema debe ser igual a cero para el equilibrio mecánico; esto es, S F 5 0. Ahora se ve una condición más. El momento de torsión neto sobre un Cuando todos los relojes sean

cuerpo o un sistema también debe ser cero para el equilibrio mecánico: St 0 donde digitales, si eso sucede, ¿tendrán

t (la letra griega minúscula tau) representa el momento de torsión. Nada que esté en significado las expresiones "en el

sentido de las manecillas del reloj"

equilibrio mecánico acelera lineal o rotacionalmente.

y "contra las manecillas del reloj" ?

P U N T O D E C O N T R O L

1. Si un tubo extiende de un modo eficaz el mango de una llave a tres veces su longitud, ¿en cuánto aumentará el momento de torsión para la misma fuerza aplicada?

VIDEO: Diferencia entre momento

2. Piensa en el subibaja equilibrado de la Figura 8.18. Imagina que la niña de de torsión y peso

la izquierda súbitamente adquiere 50 N, como sucedería si, por ejemplo, le entregaras una bolsa de manzanas. ¿Dónde deberá sentarse con la finalidad de estar en equilibrio, si supones que el niño más pesado no se mueve?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

VIDEO: Por qué una bola rueda

1. *Tres veces más apalancamiento para la misma fuerza produce tres veces más* ***colina abajo***

momento de torsión. (Cuidado: ¡Este método de aumentar el momento de torsión a veces resulta en el rompimiento del tornillo!)

2. *Debe sentarse ½ m más cerca del centro. Entonces su brazo de palanca es 2.5 m.*

Esto concuerda: 300 N 3 2.5 m 5 500 N 3 1.5 m.

SCREENCAST: Momentos de

torsión en equilibrio

***8.4** Centro de masa y centro de gravedad*

Lanza una pelota de béisbol al aire y seguirá una trayectoria parabólica suave. Lanza un bate de béisbol que gira en el aire y su trayectoria no es suave; su movimiento es bamboleante y parece bambolearse todo el camino. Pero, de hecho, se bambolea en ***SCREENCAST: Momentos de***

torno a un lugar muy especial, un punto llamado ***centro de masa (CM)****.*

torsión sobre un tablón

SCREENCAST: Momentos de

torsión en patineta

h

F I G U R A 8 . 2 1

h 3

El centro de masa de la pelota de béisbol y el del bate siguen trayectorias parabólicas.

Para un cuerpo dado, el centro de masa es la posición promedio de toda la masa que constituye al objeto. Por ejemplo, un objeto simétrico, como una pelota, tiene su cen-h

tro de masa en su centro geométrico; por el contrario, un cuerpo con forma irregular, como un bate de béisbol, tiene más de su masa hacia un extremo. Por tanto, el centro h 4

de masa de un bate de béisbol está hacia el extremo más grueso. Un cono sólido tiene su centro de masa exactamente a un cuarto de su base.

F I G U R A 8 . 2 2

***Centro de gravedad (CG)** es un término que se usa popularmente para expresar el El centro de masa para cada objeto se*

centro de masa. El centro de gravedad es simplemente la posición promedio

de la distri-muestra con el punto rojo.

bución del peso. Dado que peso y masa son proporcionales, centro de gravedad y centro

de masa se refieren al mismo punto de un objeto.5 Los físicos prefieren usar el término centro de masa porque un objeto tiene un centro de masa ya sea que esté o no bajo la influencia de la gravedad. Sin embargo, aquí se usarán ambos términos para este concepto, y se favorecerá el término centro de gravedad cuando el peso sea parte de la situación.

La fotografía estroboscópica de la Figura 8.23 muestra una vista superior de una llave que se desliza por una superficie horizontal lisa. Observa que su centro de masa, indicado por el punto blanco, sigue una trayectoria en línea recta, en tanto que otras partes de la

llave se bambolean cuando se mueven por la su-

perficie. Dado que no hay una fuerza externa que

actúe sobre la llave, su centro de masa se mueve

distancias iguales en intervalos de tiempo iguales.

El movimiento de la llave giratoria es la combina-

ción del movimiento en línea recta de su centro

de masa y el movimiento rotacional en torno a su

centro de masa.

F I G U R A 8 . 2 3

Si en vez de ello la llave se lanzara al aire, sin importar cómo gire, su centro de masa El centro de masa de la llave giratoria (o centro de gravedad) seguiría un arco parabólico liso. Lo mismo sucede con una bala sigue una trayectoria en línea recta.

de cañón que explota (Figura 8.24). Las fuerzas internas que actúan en la explosión no cambian el centro de gravedad del proyectil. Es muy interesante que, si la resistencia del aire puede despreciarse, el centro de gravedad de los fragmentos dispersos conforme vuelan por el aire estará en la misma posición que tendría el centro de gravedad de la bala de cañón si la explosión no hubiera ocurrido.

F I G U R A 8 . 2 4

El centro de masa de la bala de cañón y

sus fragmentos se mueven a lo largo de

la misma trayectoria antes y después

de la explosión.

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Dónde está el CG de una dona?

2. ¿Un objeto puede tener más de un CG?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *¡En el centro del agujero!*

2. *No. Un objeto rígido tiene un CG. Si no es rígido, como un trozo de arcilla o masilla, y se distorsiona en diferentes formas, entonces su CG puede cambiar con su forma. Incluso entonces, tiene un CG para cualquier*

forma dada.

5Para casi todos los objetos sobre y cerca de la superficie de la Tierra, dichos términos son indistintos. Puede haber una pequeña diferencia entre centro de gravedad y centro de masa en el caso de un objeto suficientemente grande como para que la gravedad varíe de una parte a otra. Por ejemplo, el centro de gravedad del edificio Empire State está aproximadamente 1 milímetro abajo de su centro de masa. Esto se debe a que los pisos más bajos son jalados con un poco más de fuerza por la gravedad de la Tierra que los pisos superiores. En el caso de los objetos cotidianos (incluidos edificios altos), puedes usar los términos centro de gravedad y centro de masa de manera indistinta.

Empuje

Ubicación del centro de gravedad

ascendente

El centro de gravedad de un objeto uniforme, como un metro, está en su

punto medio del dedo

porque el metro actúa como si todo su peso estuviera concentrado ahí. Si sostienes ese solo punto, sostienes todo el metro. Equilibrar un objeto es un método sencillo de locali-Todo el

zar su centro de gravedad. En la Figura 8.25, las muchas flechas pequeñas representan el peso

tirón de la gravedad a lo largo de todo el metro. Todas las flechas pueden combinarse en del metro

una fuerza resultante que actúa a través del centro de gravedad. Puede considerarse que ***F I G U R A 8 . 2 5***

todo el peso del metro actúa en ese solo punto. Por tanto, para equilibrar el metro puedes El peso de todo el metro se comporta

aplicar una sola fuerza ascendente en una dirección que pase por este punto.

como si estuviera concentrado en

el centro del metro.

El centro de gravedad de cualquier objeto suspendido libremente se encuentra directamente abajo del punto de suspensión o en él (Figura 8.26). Si dibujas una línea vertical que cruce el punto de suspensión, el centro de gravedad se encuentra en alguna parte a lo largo de dicha línea. Para determinar exactamente dónde se encuentra a lo largo de la línea, sólo tienes que suspender el objeto de algún otro punto y dibujar una segunda línea vertical que cruce dicho punto de suspensión. El centro de gravedad se encuentra donde intersecan las dos líneas.

El centro de masa de un objeto puede ser un punto donde no exista masa. Por ejemplo, el centro de masa de un anillo o esfera hueca está en el centro geométrico donde no existe materia. De igual modo, el centro de masa de un boomerang está afuera de la estructura física, no dentro del material del boomerang (Figura 8.28).

F I G U R A 8 . 2 6

Cómo encontrar el centro de gravedad

de un objeto con forma irregular.

VIDEO: Aprende sobre el centro

F I G U R A 8 . 2 7

de gravedad

El atleta ejecuta un "salto Fosbury" para

librar la barra mientras su centro de gravedad

pasa bajo la barra.

Centro

de masa

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Dónde está el centro de masa de la corteza de la Tierra?

2. Un metro uniforme sostenido en la marca

de 25 cm se equilibra cuando una roca de

F I G U R A 8 . 2 8

1 kg se suspende en el extremo de 0 cm.

El centro de masa puede estar afuera de

¿Cuál es la masa del metro?

la masa de un cuerpo.

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Al igual que un balón gigante de básquetbol, la corteza de la Tierra es un cascarón esférico con su centro de masa en el centro de la Tierra.*

2. *La masa del metro es 1 kg. ¿Por qué? El sistema está en equilibrio, de modo que cualquier momento de torsión debe estar equilibrado: el momento de torsión producido por el peso de la roca se equilibra con el momento de torsión igual y con dirección opuesta producido por el peso del metro aplicado en su CG, la marca de 50 cm. La fuerza de soporte en la marca de 25 cm se aplica a medio camino entre la roca y el CG del metro, de modo que los brazos de palanca en torno al punto de soporte son iguales (25 cm). Esto significa que los pesos (y en consecuencia las masas) de la roca y el metro también son iguales. (Observa que no es necesario pasar por la laboriosa tarea de considerar las partes fraccionarias del peso del*

metro en ningún lado del fulcro, porque el CG de todo el metro realmente está en un punto, ¡la marca de 50 cm!) Es interesante que el CG del sistema roca + metro esté en la marca de 25 cm, directamente arriba del fulcro.

C A PÍ T U LO 8 M OV I M I EN TO ROTACI O N A L

143

Estabilidad

La ubicación del centro de gravedad es importante para la estabilidad, como lo muestran las Figuras 8.29-8.36. Si trazas una línea recta hacia abajo desde el centro de gravedad de un objeto con cualquier forma y cae dentro de la base del objeto, está en ***equilibrio*** *estable; se equilibrará. Si la línea cae afuera de la base, el objeto es inestable.*

¿Por qué no se viene abajo la famosa torre inclinada de Pisa? Como puedes ver en la Centro

de gravedad

Figura 8.29, una línea desde el centro de gravedad de la torre hasta el nivel del suelo cae dentro de su base, de modo que la torre inclinada ha estado de pie varios siglos.

Si la torre se inclinara tanto que el centro de gravedad se extendiera fuera de la base, entonces un momento de torsión desbalanceado derribaría la torre.

Cuando te paras erguido (o te acuestas en el suelo), tu centro de gravedad está dentro de tu cuerpo. ¿Por qué el centro de gravedad es más bajo en una mujer promedio que en un hombre promedio de la misma estatura? ¿Tu centro de gravedad siempre está en el mismo punto de tu cuerpo? ¿Siempre está dentro de tu cuerpo? ¿Qué le ocurre ***F I G U R A 8 . 2 9***

cuando te inclinas hacia adelante?

El centro de gravedad de la torre incli-

Si eres bastante flexible, puedes inclinarte hacia adelante y tocarte los dedos de los nada de Pisa se encuentra arriba de su base de sostén, de modo que la torre está

pies sin doblar las rodillas. Por lo general, cuando te inclinas hacia adelante y te tocas en equilibrio estable.

los dedos de los pies, extiendes tus extremidades inferiores, como se muestra en el lado izquierdo de la Figura 8.31, de modo que tu centro de gravedad está arriba de una base de soporte: tus pies. Sin embargo, si intentas tocarte los dedos de los pies cuando te paras contra una pared, no puedes contrabalancearte y tu centro de gravedad pronto sale de tus pies, como se muestra en el lado derecho de la Figura 8.31.

F I G U R A 8 . 3 0

Cuando estás de pie, tu centro de

gravedad está en alguna parte arriba

del área de la base acotada por tus pies.

¿Por qué mantienes las piernas separadas

F I G U R A 8 . 3 1

cuando estás de pie en el pasillo de un

Tú puedes inclinarte hacia adelante y

autobús que viaja por un camino lleno

tocarte los dedos de los pies sin caer sólo

de baches?

si tu centro de gravedad está arriba del

área acotada por tus pies.

Centro

de masa

Centro

de masa

F I G U R A 8 . 3 2

El centro de masa del objeto con forma de L se ubica donde no existe

masa. (a) El centro de masa está arriba de la base de soporte, de modo que el objeto está estable. (b) El centro de masa no está arriba de la base de (a)

(b)

soporte, de modo que el objeto es inestable y caerá.

VIDEO: Desplome

F I G U R A 8 . 3 3

¿Dónde está el centro de gravedad de

Alexei en relación con sus manos?

Tú giras debido a un momento de torsión desbalanceado. Esto se demuestra en los dos objetos con forma de L de la Figura 8.34. Ambos son inestables y se desplomarán a menos que se sujeten a la superficie. Es fácil ver que, incluso cuando las dos formas tengan el mismo peso, la de la derecha es más inestable. Esto se debe a la mayor distancia del brazo de palanca y, en consecuencia, al mayor momento de torsión.

F I G U R A 8 . 3 4

Centro de masa

El momento de torsión más grande

actúa sobre (b) por dos razones.

(a)

(b)

¿Cuáles son?

Distancia más

Distancia brazo

larga brazo

de palanca

de palanca

Fulcro imaginario

Intenta equilibrar el mango de una escoba en posición vertical sobre la palma de tu mano. La base de soporte es muy pequeña y está relativamente lejos, por debajo del centro de gravedad, de modo que es difícil mantenerlo en equilibrio durante mucho tiempo. Después de algo de práctica, puedes equilibrar la escoba si aprendes a realizar ligeros movimientos de tu mano para responder exactamente a las variaciones en equilibrio. Aprendes a evitar la respuesta deficiente o excesiva a las más ligeras variaciones en el equilibrio.

F I G U R A 8 . 3 5

El intrigante Segway Human Transporter (Fi-

Giroscopios y motores asistidos por

gura 8.35) hace en gran parte lo mismo. Los

computadora realizan ajustes continuos

giroscopios perciben rápidamente las variacio-

en los vehículos eléctricos autoequili-

nes en el equilibrio, y una computadora inter-

brantes para mantener los CG combi-

nados de Mark, Tenny y los vehículos

na regula un motor para mantener el vehículo

arriba de la base con ruedas.

en posición vertical. La computadora regula

ajustes correctivos de la rapidez de las ruedas

en una forma muy similar a la manera en la que tu cerebro coordina tu acción correctiva cuando equilibras una larga pértiga sobre la palma de tu mano. Ambas hazañas son verdaderamente sorprendentes.

Para reducir la probabilidad de que se caigan, por lo general es aconsejable diseñar objetos con una base ancha y centro de gravedad bajo. Cuanto más ancha sea la base, más debe elevarse el centro de gravedad antes de que el objeto caiga.

F I G U R A 8 . 3 6

La estabilidad se determina por la distancia vertical que el centro de gravedad se eleva al inclinarse.

Un objeto con una base ancha y un centro de gravedad bajo es más estable.

C A PÍ T U LO 8 M OV I M I EN TO ROTACI O N A L

145

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Por qué es peligroso dejar abiertos los cajones superiores de un archivero totalmente lleno que no está asegurado al suelo?

2. Cuando un automóvil salta por un risco,

¿por qué gira hacia adelante mientras cae?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *El archivero lleno está en peligro de inclinarse porque el CG puede extenderse y salirse de la base de soporte. Si lo hace, entonces el momento de torsión debido a la gravedad inclina al archivero.*

2. *Cuando todas las ruedas están en el suelo, el CG del automóvil está encima de una base de soporte y no hay inclinación. Pero cuando el automóvil vuela por el risco, las ruedas frontales son las primeras en dejar el suelo y el automóvil queda sostenido sólo por las ruedas traseras. Entonces el CG se extiende y sale de la base de soporte y hay rotación. Es interesante que la rapidez del automóvil guarde relación con la cantidad de tiempo que el CG no está soportado y, en consecuencia, con la cantidad de rotación del automóvil mientras cae.*

8.5 *Fuerza centrípeta*

Cualquier fuerza dirigida hacia un centro fijo se llama ***fuerza centrípeta****. Centrípeto significa "que busca el centro" o "hacia el centro". Cuando haces girar una lata sujeta en el extremo de una cuerda, descubres que debes seguir tirando de la cuerda, lo que ejerce una fuerza centrípeta (Figura 8.37). La cuerda transmite la fuerza centrípeta, que pone a la lata en una trayectoria circular. Las fuerzas gravitacional y eléctrica pueden producir fuerzas centrípetas. La Luna, por ejemplo, se mantiene en una órbita casi circular por la fuerza gravitacional dirigida hacia el centro de la Tierra. Los electrones que orbitan en los átomos experimentan una fuerza eléctrica hacia los núcleos centra-* ***F I G U R A 8 . 3 7***

les. Cualquier cosa que se mueva en una trayectoria circular lo hace porque sobre ella La fuerza que se ejerce sobre la lata que actúa una fuerza centrípeta.

gira es hacia el centro.

La fuerza centrípeta depende de la masa m, la rapidez tangencial v y el radio de curvatura r del objeto que se mueve circularmente. En el laboratorio, seguramente usarás la relación exacta

$F = mv\ 2/\ r$

Observa que la rapidez es al cuadrado, de modo que el doble de rapidez necesita cuatro ***VIDEO: Fuerza centrípeta***

veces la fuerza. La relación inversa con el radio de curvatura indica que la mitad de la distancia radial exige el doble de fuerza.

La fuerza centrípeta no es una fuerza básica de la naturaleza; es tan sólo el nombre dado a cualquier fuerza, ya sea tensión de cuerda, gravitacional, eléctrica, o cualquiera, que se dirige hacia un centro fijo. Si el movimiento es circular y se ejecuta con rapidez constante, esta fuerza está en ángulo recto con respecto a la trayectoria del objeto en movimiento.

SCREENCAST: Fuerza centrípeta

Cuando un automóvil da vuelta en una esquina, la fricción entre las llantas y el camino proporciona la fuerza centrípeta que mantiene al automóvil en una trayectoria curva (Figura 8.39). Si esta fricción es insuficiente (porque hay aceite o grava sobre el ***F I G U R A 8 . 3 8***

La fuerza centrípeta (adhesión de lodo sobre la

llanta que gira) no es suficientemente grande

para mantener el lodo sobre la llanta, de modo

que sale disparado en líneas tangentes rectas.

Centro de curvatura

pavimento, por ejemplo), las llantas se deslizan hacia los lados y el automóvil no logra hacer la curva; el automóvil tiende a derraparse tangencialmente fuera del camino.

Fuerza centrípeta

La fuerza centrípeta realiza la tarea principal en el funcionamiento de una centrífuga. Un ejemplo familiar es la tina giratoria de una lavadora automática (Figura 8.41).

En su ciclo de giro, la tina gira con gran rapidez y produce una fuerza centrípeta sobre la ropa húmeda, que es forzada en una trayectoria circular por la pared interna de la tina. La tina ejerce gran fuerza sobre la ropa, pero los orificios de la tina impiden que se ejerza la misma fuerza sobre el agua en la ropa. El agua escapa tangencialmente por (a)

los agujeros. Estrictamente hablando, la ropa es obligada a alejarse del agua; el agua no es obligada a alejarse de la ropa. Piénsalo.

Centro de curvatura

Fuerza centrípeta

(b)

F I G U R A 8 . 3 9

(a) Cuando un automóvil negocia una curva, debe haber una fuerza que empuje al automóvil hacia el centro de la curva. (b) Un automóvil derrapa en una curva cuando la fuerza centrípeta (fricción del camino sobre las llantas) no es suficientemente grande.

F I G U R A 8 . 4 0

Grandes fuerzas centrípetas sobre las alas de un avión le permiten volar en bucles circulares. La aceleración lejos de la trayectoria en línea recta que seguiría el avión en ausencia de fuerza centrípeta con frecuencia es muchas veces mayor que la aceleración debida a la gravedad, g. Por ejemplo, si la aceleración centrípeta es 50 m/s2 (cinco veces mayor que 10 m/s2), se dice que el avión experimenta 5 g. Para un piloto, el número de g se define por la fuerza sobre el asiento. De modo que en el fondo del bucle, donde el peso del piloto se alinea con la fuerza centrípeta, el piloto experimenta ***F I G U R A 8 . 4 1***

6 g. Los aviones de combate típicos están diseñados para soportar aceleraciones de hasta 8 o 9 g.

Las ropas son forzadas a seguir una

Tanto el piloto como el avión deben soportar esta cantidad de aceleración. Los pilotos de aviones trayectoria circular, pero eso no ocurre

de combate usan trajes de presión para evitar que la sangre vaya de la cabeza a los pies, lo que con el agua.

podría provocar un desmayo.

PRACTICANDO LA FÍSICA: BALANCEO DE CUBETA CON AGUA

Llena a la mitad una cubeta con agua y balancéala en un círculo vertical, como demuestra Marshall Ellenstein. La cubeta y el agua aceleran hacia el centro de tu balanceo. Si balanceas la cubeta suficientemente rápido, el agua no caerá cuando esté arriba. Es interesante que, aunque el agua no saldrá, todavía caerá. El truco es balancear la cubeta suficientemente rápido de modo que la cubeta caiga tan rápido como cae el agua dentro de la cubeta. ¿Puedes ver que, debido a que la cubeta va en círculos, el agua se mueve tangencialmente y permanece en la cubeta? En el Capítulo 10 aprenderás que un transbordador espacial en órbita cae igualmente mientras orbita. El truco es impartir suficiente velocidad tangencial al transbordador de modo que caiga alrededor de la Tierra curva en lugar de hacia ella.

***8.6** Fuerza centrífuga*

*Aunque la fuerza centrípeta se dirige hacia el centro, un ocupante dentro de un sistema en rotación parece experimentar una fuerza hacia afuera. Esta aparente fuerza hacia afuera se llama **fuerza centrífuga**. Centrífugo significa "huir del centro" o "alejarse del centro". En el caso de la lata que gira en el extremo de una cuerda, es una mala interpretación frecuente creer que una fuerza centrífuga tira hacia afuera sobre la lata. Si la cuerda que mantiene el giro se rompe (Figura 8.42), la lata no se mueve radialmente hacia adentro, sino que sale en una trayectoria en línea recta tangente, porque no actúa fuerza sobre ella. Esto se ilustra con otro ejemplo.*

*Supón que eres pasajero en un automóvil que súbitamente se detiene. Te proyectas **F I G U R A 8 . 4 2***

hacia adelante, hacia el tablero. Cuando esto ocurre no dices que algo te forzó hacia Cuando la cuerda se rompe, la lata adelante. De acuerdo con la ley de la inercia, te proyectas hacia adelante debido a la giratoria se mueve en una línea recta, ausencia de una fuerza, que habría proporcionado el cinturón de seguridad. De igual tangente al centro de su trayectoria modo, si estás en un automóvil que negocia una curva cerrada hacia la izquierda, tien- circular, no hacia afuera de él.

des a proyectarte hacia afuera hacia la derecha, no debido a alguna fuerza hacia afuera o centrífuga, sino debido a que no hay fuerza centrípeta que te sostenga en movimiento circular (de nuevo, el propósito del cinturón de seguridad). La idea de que una fuerza centrífuga te dispara contra la puerta del automóvil es una mala interpretación. (Claro, empujas contra la puerta, pero sólo porque la puerta empuja sobre ti: tercera ley de

SCREENCAST: Fuerza centrífuga

Newton.)

F I G U R A 8 . 4 3

La única fuerza que se ejerce sobre la

lata giratoria (si desprecias la gravedad)

se dirige hacia el centro del movimiento

circular. Ésta es una fuerza centrípeta.

Ninguna fuerza hacia afuera actúa sobre

la lata.

Del mismo modo, cuando balanceas una lata en una trayectoria circular, ninguna Fuerza centrípeta

fuerza tira de la lata hacia afuera: la única fuerza sobre la lata es la cuerda que tira hacia adentro. No hay fuerza hacia afuera sobre la lata. Ahora supón que hay una mariquita dentro de la lata giratoria (Figura 8.44). La lata presiona contra los pies del bicho y proporciona la fuerza centrípeta que la mantiene en una trayectoria circular. Desde tu marco de referencia estacionario exterior, no ves fuerza centrífuga ejercida sobre la mariquita, tal como ninguna fuerza centrífuga te dispara contra la puerta del automóvil. ***FIGURA 8.44***

El efecto de fuerza centrífuga es causado no por una fuerza real, sino por la inercia: la La lata proporciona la fuerza centrípeta tendencia del objeto en movimiento a seguir una trayectoria en línea recta. ¡Pero trata necesaria para mantener a la mariquita de decirle eso a la mariquita!

en una trayectoria circular.

Fuerza centrífuga en un marco de referencia en rotación

Si permaneces en reposo y observas que alguien da vueltas a una lata sobre su cabeza en un círculo horizontal, ves que la fuerza sobre la lata es centrípeta, tal como lo es sobre una mariquita dentro de la lata. El fondo de la lata ejerce una fuerza sobre los pies de la mariquita. Si desprecias la gravedad, ninguna otra fuerza actúa sobre la mariquita. Pero, visto desde el interior del marco de referencia de la lata giratoria, las cosas parecen muy diferentes.6

En el marco de referencia en rotación de la mariquita, además de la fuerza de la lata sobre los pies de la mariquita, hay una aparente fuerza

centrífuga que se ejerce sobre la mariquita. La fuerza centrífuga en un marco de referencia en rotación es una fuerza por derecho propio, tan real como el jalón de la gravedad. Sin embargo, hay una diferencia 6Un marco de referencia en el que un cuerpo libre no muestre aceleración se llama marco de referencia inercial.

En un marco de referencia inercial se ve que las leyes de Newton se sostienen con exactitud. Un marco de referencia en rotación, por el contrario, es un marco de referencia acelerado. Las leyes de Newton no son válidas en un marco de referencia acelerado.

fundamental. La fuerza gravitacional es una interacción entre una masa y otra. La gra-201 N

vedad que experimentas es tu interacción con la Tierra. Pero para la fuerza centrífuga 200 N

en el marco en rotación, no existe tal agente: no hay contraparte de interacción. La fuerza centrífuga se siente como la gravedad, pero no hay algo que jale. Nada produce el jalón; en vez de ello, la fuerza que sientes es resultado de la rotación. No hay contraparte que jale. Por esta razón, los físicos la llaman fuerza "inercial" (o en ocasiones fuerza ficticia): una

fuerza aparente, y no una fuerza real como la gravedad, las fuerzas electromagnéticas y las fuerzas nucleares. No obstante, para los observadores que están en un sistema en rotación, la fuerza centrífuga se siente como, y se interpreta que es, ***F I G U R A 8 . 4 5***

una fuerza muy real. Así como la gravedad siempre está presente en la superficie de la En el marco de referencia de la Tierra

Tierra, la fuerza centrífuga siempre está presente en un sistema en rotación.

que gira, experimentas una fuerza

centrífuga que disminuye un poco tu

peso. Al igual que un caballo exterior

en un tiovivo, tienes la mayor rapidez

P U N T O D E C O N T R O L

tangencial cuando estás más lejos del eje

de la Tierra, en el ecuador. Por tanto,

Una pesada bola de hierro se ata con un resorte

la fuerza centrífuga es máxima cuando

a una plataforma giratoria, como se muestra en

estás en el ecuador y cero en los polos,

el dibujo. Dos observadores, uno en el marco en

donde no tienes rapidez tangencial. De

rotación y uno sobre el suelo en reposo, observan

modo que, estrictamente hablando, si

su movimiento. ¿Cuál observador ve que la bola se jala hacia afuera y estira *quieres perder peso, ¡camina hacia el*

ecuador!

el resorte? ¿Cuál ve que el resorte jala a la bola en movimiento circular?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

El observador en el marco de referencia de la plataforma giratoria afirma que una fuerza centrífuga jala radialmente hacia afuera sobre la bola, lo que estira el resorte.

El observador en el marco en reposo afirma que una fuerza centrípeta suministrada por el resorte estirado jala de la bola en un movimiento circular. Sólo el observador Fuerza centrífuga

en el marco en reposo puede identificar un par de fuerzas acción-reacción; donde la acción es el resorte sobre la bola, la reacción es la bola sobre el resorte. El observador en rotación no puede identificar una contraparte de reacción para la fuerza centrífuga, ¡porque no la hay!

F I G U R A 8 . 4 6

Desde el marco de referencia de la

Gravedad simulada

mariquita dentro de la lata giratoria,

Piensa en una colonia de mariquitas que viven dentro de una llanta de bicicleta: un neu-se mantiene en el fondo de la lata por

una fuerza que se aleja del centro del

mático con mucho espacio interior. Si lanzas la llanta de bicicleta al aire o la sueltas desde movimiento circular. La mariquita llama un avión alto en el cielo, las mariquitas estarán en una condición de ingravidez. Flotarán a esta fuerza hacia afuera una fuerza

libremente mientras la rueda esté en caída libre. Ahora haz girar la rueda. Las mariquitas centrífuga, que es tan real para ella como se sentirán presionadas hacia la parte exterior de la superficie interior del neumático. Si la gravedad.

la rueda gira justo a la rapidez correcta, las mariquitas experimentarán gravedad simulada que sentirán como la gravedad a la que están acostumbradas. La gravedad se simula mediante una fuerza centrífuga. La dirección "abajo" para las mariquitas será lo que llamarías radialmente hacia afuera, alejándose del centro de la rueda.

En la actualidad, los seres humanos viven en la superficie exterior de este plantea esférico y se mantienen ahí por la gravedad. El planeta ha sido la

cuna de la humanidad.

F I G U R A 8 . 4 7

Si la rueda que gira cae libremente, las mariquitas en el interior experimentarán una fuerza centrífuga que sentirán como gravedad cuando la rueda gire al ritmo adecuado. Para los ocupantes, la dirección "arriba" es hacia el centro de la rueda y "abajo" es radialmente hacia afuera.

F I G U R A 8 . 4 9

F I G U R A 8 . 4 8

Visto desde el interior del sistema en rotación, además de la interacción La

interacción entre el hombre y el suelo, vista desde un marco

hombre-suelo, hay una fuerza centrífuga ejercida sobre el hombre en

de referencia estacionario afuera del sistema en rotación. El

su centro de masa. Parece tan real como la gravedad. Sin embargo, a

suelo presiona contra el hombre (acción) y el hombre presiona de

diferencia de la gravedad, no tiene contraparte de reacción: no hay nada vuelta sobre el suelo (reacción). La única fuerza ejercida sobre el

afuera sobre lo que pueda jalar. La fuerza centrífuga no es parte de una hombre es la del suelo. Se dirige hacia el centro y es una fuerza

interacción, sino una consecuencia de la rotación. Por tanto, se le llama centrípeta.

fuerza aparente o fuerza ficticia.

Pero no lo será siempre. El ser humano se está volviendo gente de vuelos espaciales. Los ocupantes de los vehículos espaciales de hoy sienten ingravidez porque no experimentan fuerza de soporte. No son presionados contra un suelo de soporte por la gravedad, ni experimentan una fuerza centrífuga debida a un giro. Durante periodos prolongados, esto puede causar pérdida de fuerza muscular y daños en el cuerpo, como la pérdida de calcio de los huesos. Pero los futuros viajeros espaciales no necesitarán estar sujetos Un hábitat giratorio no necesita

a ingravidez. Sus hábitats espaciales probablemente girarán, como la rueda giratoria de ser una rueda enorme. La grave-las mariquitas, lo que efectivamente proporcionará una fuerza de soporte y simulará dad podría simularse en un par de

cápsulas que den vueltas conecta-

muy bien la gravedad.

das con un largo cable.

La significativamente más pequeña Estación Espacial Internacional no gira. Por tanto, los miembros de su tripulación deben adaptarse a vivir en un ambiente de ingravidez.

Los hábitats giratorios pueden venir más adelante, acaso en enormes estructuras que giren lentamente donde los ocupantes se mantendrán en las

superficies interiores mediante una fuerza centrífuga. Tal hábitat giratorio proporciona una gravedad simulada de modo que el cuerpo humano pueda funcionar con normalidad. Las estructuras de diámetro pequeño tendrían que girar a altas rapideces para proporcionar una aceleración gravitacional simulada de 1 g. Hay pequeños órganos sensibles y delicados en el ***VIDEO: Gravedad simulada***

oído interno que sienten la rotación. Aunque parece no haber dificultad en una sola revolución por minuto (RPM) o algo así, muchas personas encuentran difícil adaptarse a rapideces mayores a 2 o 3 RPM (aunque algunas se adaptan con facilidad a 10 o más RPM). Para simular una gravedad terrestre normal a 1 RPM es indispensable una estructura muy grande, de aproximadamente 2 km de diámetro. La aceleración centrífuga es directamente proporcional a la distancia radial desde el centro, de modo que son posibles varios estados g. Si la estructura gira de modo que los habitantes en el interior del borde exterior experimenten 1 g, entonces a la mitad del camino hacia el eje experimentarían 0.5 g. En el eje en sí experimentarían ingravidez (0 g). La variedad de fracciones de g posibles desde el borde de un hábitat espacial giratorio promete un ambiente diferente y (al momento de escribir esto) todavía no experimentado. En esta estructura todavía bastante hipotética, podría bailarse ballet a 0.5 g, hacer clavados y acrobacias a 0.2 g y en estados de menor g, y jugar soccer tridimensional (y nuevos deportes todavía no concebidos) en estados g muy bajos.

P U N T O D E C O N T R O L

Si la Tierra tuviera que girar más rápido en torno a su eje, tu peso sería menor. Si estuvieras en un hábitat espacial en rotación que aumentara su tasa de giro, "pesarías" más. Explica por qué mayores tasas de giro producen efectos opuestos en estos casos.

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Tú estás en el exterior de la Tierra giratoria, pero estarías en el interior de un hábitat espacial giratorio. Una mayor tasa de giro en el exterior de la Tierra tiende a despegarte de una báscula, lo que hace que se muestre una reducción en tu peso, pero te pega contra una báscula dentro del hábitat espacial, para así mostrar un aumento en tu peso.

8.7 *Cantidad de movimiento angular*

Las cosas que giran, ya sea una colonia espacial, un cilindro que rueda por un plano inclinado o un acróbata que hace un salto mortal, siguen girando hasta que algo las detiene.

Un objeto en rotación tiene una "inercia de rotación". Recuerda del Capítulo 6 que todos los objetos en movimiento tienen "inercia de movimiento" o cantidad de movimiento: ***SCREENCAST: Cantidad***

el producto de masa y velocidad. Este tipo de cantidad de movimiento es ***cantidad de de movimiento angular***

movimiento lineal*. De igual modo, la "inercia de rotación" de los objetos que giran se llama* ***cantidad de movimiento angular****. Un planeta que orbita el Sol, una roca que gira sujeta al extremo de una cuerda y los pequeños electrones que giran en torno a los núcleos atómicos tienen todos cantidad de movimiento angular.*

La cantidad de movimiento angular se define como el producto de la inercia rotacional y la velocidad rotacional:

Cantidad de movimiento angular inercia rotacional velocidad rotacional Es la contraparte de la cantidad de movimiento lineal:

Cantidad de movimiento lineal masa velocidad

Al igual que la cantidad de movimiento lineal, la cantidad de movimiento angular es una cantidad vectorial y tiene dirección así como magnitud. En este libro no se abordará la naturaleza vectorial de la cantidad de movimiento angular (ni del momento de torsión, que también es un vector), excepto para reconocer la extraordinaria acción del giroscopio. La rueda de bicicleta giratoria de la Figura 8.50 muestra lo que ocurre cuando un momento de torsión causado por la gravedad de la Tierra actúa para cambiar la dirección de su cantidad de movimiento angular (que es a lo largo del eje de la rueda).

El tirón de la gravedad que normalmente actúa para tumbar la rueda y cambiar su eje de rotación hace, más bien, que preceda en torno a un eje vertical. Tienes que hacerlo tú mismo de pie sobre una tornamesa para creerlo realmente. Es probable que no lo comprendas por completo a menos que realices estudios avanzados en el futuro.

Para el caso de un objeto que sea pequeño comparado con la distancia radial respecto de su eje de rotación, como una lata que gira sujeta de una larga cuerda o un planeta ***F I G U R A 8 . 5 0***

La cantidad de movimiento angular mantiene el eje de la rueda casi horizontal cuando un momento de torsión proporcionado por la gravedad de la Tierra actúa sobre ella. En lugar de hacer que la rueda caiga, el momento de torsión hace que el eje de la rueda gire lentamente alrededor del círculo de estudiantes. A esto se le llama precesión.

que orbita en un círculo alrededor del Sol, la cantidad de movimiento angular puede v

expresarse como la magnitud de su cantidad de movimiento lineal, mv, multiplicada por la distancia radial, r (Figura 8.51). En notación abreviada, Cantidad de movimiento angular mvr

r

m

Así como una fuerza externa neta es indispensable para cambiar la cantidad de movimiento lineal de un objeto, se necesita un momento de torsión externo neto para cambiar la cantidad de movimiento angular de un objeto. Es posible plantear una versión rotacional de la primera ley de Newton (la ley de la inercia): ***F I G U R A 8 . 5 1***

Un objeto o sistema de objetos conservará su cantidad de movimiento angular *Un objeto pequeño de masa m que gira* ***a menos que actúe sobre él un momento de torsión externo neto.***

en una trayectoria circular de radio r

con una rapidez v tiene cantidad de

El sistema solar tiene una cantidad de movimiento angular que incluye al Sol, los pla- movimiento angular mvr.

netas que giran y orbitan, y miríadas de otros cuerpos más pequeños. La cantidad de movimiento angular del sistema solar en la actualidad será su cantidad de movimiento angular durante eones por venir. Sólo un momento de torsión externo proveniente del exterior del sistema solar puede

cambiarlo. En ausencia de tal momento de torsión, se dice que la cantidad de movimiento angular del sistema solar se conserva.

***8.8** Conservación de la cantidad*

de movimiento angular

Así como la cantidad de movimiento lineal de cualquier sistema se conserva si sobre el sistema no actúa ninguna fuerza neta, la cantidad de movimiento angular se conserva si no actúa un momento de torsión neto. La ***ley de conservación de la cantidad de movimiento angular*** *afirma:*

VIDEO: Conservación de la cantidad

Si sobre un sistema en rotación no actúa ningún momento de torsión externo de movimiento angular cuando

neto, la cantidad de movimiento angular de dicho sistema permanece constante.

se usa una plataforma giratoria

Esto significa que, sin un momento de torsión externo, el producto de la inercia rotacional y la velocidad rotacional en un momento será el mismo que en cualquier otro momento.

Un ejemplo interesante que ilustra la conservación de la cantidad de movimiento angular se muestra en la Figura 8.52. El hombre está de pie sobre una tornamesa de baja fricción con pesas extendidas. Su inercia rotacional, I, con la ayuda de las pesas extendidas, es relativamente grande en esta posición. A medida que gira lentamente, su cantidad de movimiento angular es el producto de su inercia rotacional y velocidad rotacional, . Cuando lleva las pesas hacia adentro, la inercia rotacional de su cuerpo y las pesas se reduce en forma considerable. ¿Cuál es el resultado? ¡Aumenta su rapidez rotacional! Este ejemplo lo aprecia mejor la persona que gira, quien siente cambios en la rapidez rotacional que parecen misteriosos. ¡Pero es física pura! Este procedimiento lo usa un patinador de figura que comienza a girar con los brazos y acaso una pierna extendidos y luego retrae los brazos y la pierna para obtener una mayor rapidez rotacional. Siempre que un cuerpo en rotación se contrae, su rapidez rotacional aumenta.

F I G U R A 8 . 5 2

Conservación de la cantidad de movi-

miento angular. Cuando el hombre lleva los brazos y las pesas giratorias hacia adentro, reduce su inercia rotacional I, y su rapidez rotacional aumenta en correspondencia.

$$I\,\omega = I\,\omega$$

152

PA R T E U N O

F I G U R A 8 . 5 3

Para controlar la rapidez rotacional, se llevan a cabo variaciones en la inercia rotacional del cuerpo a medida que la cantidad de movimiento angular se conserva durante un salto mortal hacia adelante.

1

2

3

4

5

6

7

8

¿Por qué los acróbatas de baja estatura tienen ventaja cuando dan volteretas y realizan otros movi-

De igual modo, cuando un gimnasta gira libremente en ausencia de momentos de mientos rotacionales sucesivos?

torsión desbalanceados sobre su cuerpo, la cantidad de movimiento angular no cambia. Sin embargo, la rapidez rotacional puede cambiar con sólo realizar variaciones en la inercia rotacional. Para hacer esto, se acerca o se aleja alguna parte del cuerpo del eje de rotación.

Si un gato se mantiene boca arriba y se suelta a una corta distancia del suelo, es capaz de ejecutar un giro y aterrizar erguido, incluso si no tiene

cantidad de movimiento angular inicial. Para realizar giros y vueltas con cantidad de movimiento angular cero se gira una parte del cuerpo contra la otra. Mientras cae, el gato dobla su columna vertebral y la balancea para girar en la dirección opuesta. Durante esta maniobra la cantidad de movimiento angular total permanece en cero (Figura 8.54). Cuando termina, el gato no está girando. Esta maniobra gira el cuerpo a través de un ángulo, pero no crea rotación continua. Hacerlo violaría la conservación de la cantidad de movimiento angular.

Los seres humanos pueden realizar giros similares sin dificultad, aunque no tan rápido como un gato. Los astronautas aprenden a realizar rotaciones con cantidad de movimiento angular cero conforme orientan sus cuerpos en las direcciones que prefieren cuando flotan libremente en el espacio.

La ley de conservación de la cantidad de movimiento angular se observa en los movimientos de los planetas y las formas de las galaxias. Es fascinante observar que la conservación de la cantidad de movimiento angular indica que la Luna se aleja cada vez más de la Tierra. Esto se debe a que la rotación diaria de la Tierra se reduce lentamente debido a la fricción de las aguas oceánicas sobre el fondo marino, tal como las ruedas de un automóvil frenan cuando se aplican los frenos. Esta disminución de la cantidad de movimiento angular de la Tierra se acompaña de un aumento igual de la cantidad de movimiento angular de la Luna en su movimiento orbital alrededor de la Tierra, lo que resulta en la distancia cada vez mayor de la Luna respecto de la Tierra y en rapidez decreciente. Este aumento de la distancia representa un cuarto de centímetro por rotación. ¿Haz notado que la Luna últimamente se aleja más de nosotros? Bueno, lo hace; cada vez que veas otra Luna llena, ¡estará un cuarto de centímetro más lejos!

¡Oh, sí! Antes de terminar este capítulo, se dará la respuesta a la pregunta 3 del Punto de control de la página 138. Las tapas de las alcantarillas son circulares porque una tapa circular es la única forma que no puede caer en el agujero. Una tapa cuadrada, por ejemplo, puede inclinarse verticalmente y girar de modo que puede caer diagonal-F I G U R A 8 . 5 4

mente en el agujero. Lo mismo ocurre con todas las demás formas. Si trabajas en una Fotografía estroboscópica de un gato

alcantarilla y algunos chicos traviesos tontean por ahí, ¡estarás agradecido de que la que cae.

tapa sea redonda!

C A PÍ T U LO 8 R E V ISI Ó N

RESUMEN DE TÉRMINOS *(CONOCIMIENTO)*

Rapidez tangencial. *Rapidez lineal tangente respecto de una*

Fuerza centrípeta. *Fuerza dirigida hacia un punto fijo, por lo trayectoria curva, como en el movimiento circular.*

general la causa de movimiento circular:

Rapidez rotacional. *El número de rotaciones o revoluciones*

F mv 2 /r

por unidad de tiempo; con frecuencia se mide en rotaciones

o revoluciones por segundo o por minuto. (Por lo general,

Fuerza centrífuga. *Aparente fuerza hacia afuera en un marco*

los científicos la miden en radianes por segundo.)

de referencia en rotación. Es aparente (ficticia) en el sentido de

que no es parte de una interacción, sino que es resultado de

Inercia rotacional. *Propiedad de un objeto para resistir cual-rotación, sin contraparte de fuerza de reacción.*

quier cambio en su estado de rotación: si está en reposo, el

cuerpo tiende a permanecer en reposo; si está en rotación, tien-

Cantidad de movimiento lineal *El producto de la masa de*

de a permanecer en rotación y continuará haciéndolo a menos

un objeto y su velocidad lineal.

que sobre él actúe un momento de torsión externo neto.

Cantidad de movimiento angular. *El producto de la*

Momento de torsión. *El producto de fuerza y distancia de brazo inercia rotacional y la velocidad rotacional de un cuerpo en*

de palanca, que tiende a producir o cambiar la rotación:

torno a un eje particular. Para un objeto que es pequeño

en comparación con la distancia radial, la cantidad de

Momento de torsión brazo de palanca fuerza

movimiento angular puede expresarse como el producto de

Centro de masa (CM). *La posición promedio de la masa de un*

masa, rapidez y distancia radial de rotación.

objeto. El CM se mueve como si todas las fuerzas externas

Conservación de la cantidad de movimiento angular. *Cuando*

actuaran en este punto.

sobre un objeto o sistema de objetos no actúa un momento de

Centro de gravedad (CG). *La posición promedio del peso o el*

torsión externo, no puede ocurrir cambio en la cantidad de

único punto asociado a un objeto donde puede pensarse que

movimiento angular. Por tanto, la cantidad de movimiento

actúa la fuerza de gravedad.

angular antes de un evento que sólo involucra momentos de

Equilibrio. *Estado de un objeto en el que no actúa sobre él una torsión*
internos o ningún momento de torsión es igual a la

fuerza neta o un momento de torsión neto.

cantidad de movimiento angular después del evento.

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S *(C O M P R E N S I Ó N)*
8.1 Movimiento circular

10. ¿Por qué doblar las piernas cuando corres te permite

1. ¿Cuáles son las unidades de medición para la rapidez

balancearlas de ida y vuelta más rápidamente?

tangencial? ¿Para la rapidez rotacional?

11. ¿Cuál tiene mayor aceleración al rodar por un plano

2. En una tornamesa giratoria, ¿es la rapidez tangencial o la

inclinado: un aro o un disco sólido?

rapidez rotacional la que varía con la distancia respecto

8.3 Momento de torsión

del centro?

12. ¿Qué tiende a hacer un momento de torsión a un objeto?

3. Un vaso inclinado que rueda sobre una superficie plana

forma una trayectoria circular. ¿Qué te dice esto acerca de

13. ¿Qué se entiende por "brazo de palanca" de un momento

la rapidez tangencial del borde del extremo ancho del vaso

de torsión?

en comparación con la del borde del extremo angosto?

14. ¿Cuál es la diferencia entre los momentos de torsión en

4. ¿De qué manera el borde inclinado de una rueda en un

sentido de las manecillas del reloj y contra las manecillas

ferrocarril permite que una parte del borde tenga mayor rapi-

del reloj cuando un sistema está en equilibrio?

dez tangencial que otra parte cuando rueda sobre una vía?

8.4 Centro de masa y centro de gravedad

8.2 Inercia rotacional

15. Si lanzas un bastón al aire, parece bambolearse en todas

5. ¿Qué es la inercia rotacional y en qué se parece a la

partes. Específicamente, ¿en torno a qué lugar parece

inercia que estudiaste en capítulos anteriores?

bambolearse?

6. La inercia depende de la masa; la inercia rotacional

16. ¿Dónde está el centro de masa de una pelota de béisbol?

depende de la masa y algo más. ¿De qué?

¿Dónde está su centro de gravedad? ¿Dónde están dichos

centros para un bate de béisbol?

7. A medida que la distancia aumenta entre la mayor parte

de la masa de un objeto y su centro de rotación, ¿la

17. Si te cuelgas en reposo de las manos de una soga vertical,

inercia rotacional aumenta o disminuye?

¿dónde está tu centro de gravedad con respecto a la soga?

8. Considera tres ejes de rotación para un lápiz: a lo largo

18. ¿Dónde está el centro de masa de un balón de soccer hueco?

del grafito; en ángulo recto con el grafito en el medio; en

19. ¿Cuál es la relación entre el centro de gravedad y la base

ángulo recto con el grafito en un extremo. Clasifica las

de soporte para un objeto que está en equilibrio estable?

inercias rotacionales en torno a cada eje de menor a mayor.

20. ¿Por qué la torre inclinada de Pisa no se viene abajo?

9. ¿Cuál es más fácil poner a balancear: un bate de béisbol

21. En términos de centro de gravedad, base de soporte y

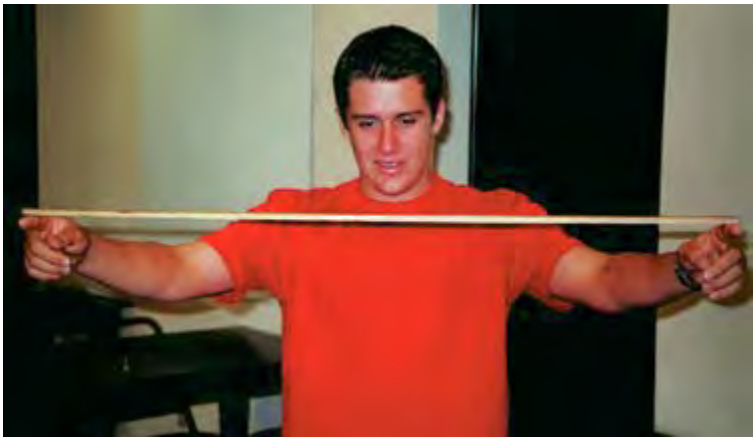
que se sostiene por el extremo angosto, o uno sostenido

momento de torsión, ¿por qué no puedes estar de pie con los

más cerca del extremo masivo (estrangulado)?

talones y la espalda contra una pared y luego doblarte para

tocarte los dedos de los pies y regresar a tu posición vertical?



8.5 Fuerza centrípeta

26. ¿Por qué la fuerza centrífuga en un marco en rotación se

22. Cuando haces girar una lata sujeta en el extremo de una

denomina "fuerza ficticia"?

cuerda en una trayectoria circular, ¿cuál es la dirección de

27. ¿Cómo puede simularse la gravedad en una estación

la fuerza que ejerces sobre la lata?

espacial en órbita?

23. Durante el ciclo de giro de una lavadora automática, la

8.7 Cantidad de movimiento angular

fuerza que se ejerce sobre la ropa, ¿es una fuerza hacia

adentro o una fuerza hacia afuera?

28. Distingue entre cantidad de movimiento lineal y

cantidad de movimiento angular.

8.6 Fuerza centrífuga

29. ¿Cuál es la ley de inercia para sistemas en rotación en

24. Si se rompe la cuerda que mantiene en una trayectoria

términos de cantidad de movimiento angular?

circular una lata que gira, ¿qué tipo de fuerza hace que

se mueva en línea recta: centrípeta, centrífuga o ninguna

8.8 Conservación de la cantidad

fuerza? ¿Qué ley de la física apoya tu respuesta?

de movimiento angular

25. Si no usas cinturón de seguridad en un automóvil que

30. Si un patinador que gira lleva sus brazos hacia adentro

negocia una curva y te deslizas en tu asiento y chocas

de modo que reduce su inercia rotacional a la mitad, ¿en

contra la puerta del automóvil, ¿qué tipo de fuerza es

cuánto cambiará su cantidad de movimiento angular?

responsable de tu desliz: centrípeta, centrífuga o ninguna

¿En cuánto aumentará su tasa de giro? (¿Por qué tus

fuerza? ¿Por qué la respuesta correcta es "ninguna fuerza"?

respuestas son diferentes?)

P I E N S A Y R E A L I Z A *(A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 31. Escribe una carta a tu abuelo y cuéntale cómo aprendiste*

puede tocarse los dedos de los pies con los talones más

a distinguir entre conceptos muy relacionados, con los

cerca de la pared: hombres o mujeres? En promedio, y en

ejemplos de fuerza y momento de torsión. Cuéntale en

proporción a la estatura, ¿cuál género tiene el centro de

qué se parecen y en qué se diferencian. Sugiere dónde

gravedad más bajo?

puede encontrar cosas "a la mano" en su casa que puedan

35. Primero pide a un amigo que se pare de frente a una

ilustrar la diferencia entre los dos. Cita también un

pared con los dedos de los pies en contacto con la pared.

ejemplo que muestre cómo la fuerza neta sobre un objeto

Luego pídele que se pare sobre los talones sin caer hacia

puede ser cero aunque el momento de torsión neto no

atrás. Tu amigo no podrá hacerlo. Ahora explica por qué

lo sea, así como un ejemplo que muestre lo contrario.

no puede hacerlo.

(¡Ahora, alegra a tu abuelo y envíale una verdadera carta!)

36. Apoya un metro sobre tus dos dedos índices extendidos

32. Une un par de vasos de espuma de estireno por sus extremos

como se muestra. Junta lentamente los dedos. ¿En qué parte

anchos y ponlos a rodar sobre un par de metros que simulen

del metro se reúnen los dedos? ¿Puedes explicar por qué esto

vías de ferrocarril. Observa cómo se autocorrigen siempre

siempre ocurre, sin importar dónde comiencen tus dedos?

que sus trayectorias se alejan del centro. Pregunta: si pegas

los vasos por sus extremos angostos, de modo que se inclinen

opuestos como se muestra, ¿el par de vasos se autocorregiría

cuando ruede un poco fuera del centro?

?

33. Une un tenedor, una cuchara y un fósforo de madera

como se muestra. La combinación se equilibrará bastante

bien, en el borde de un vaso, por ejemplo. Esto ocurre

37. Coloca el gancho de una percha sobre tu dedo. Con

porque el centro de gravedad en realidad "cuelga" por

cuidado equilibra una moneda en el alambre recto en

abajo del punto de soporte.

el fondo justo debajo del gancho. Tal vez tendrás que

aplanar el alambre con un martillo o crear una pequeña

plataforma con cinta. Con una cantidad sorprendente-

mente pequeña de práctica podrás balancear la percha y

la moneda equilibrada de ida y vuelta y luego en círculos.

La fuerza centrípeta mantiene la moneda en su lugar.

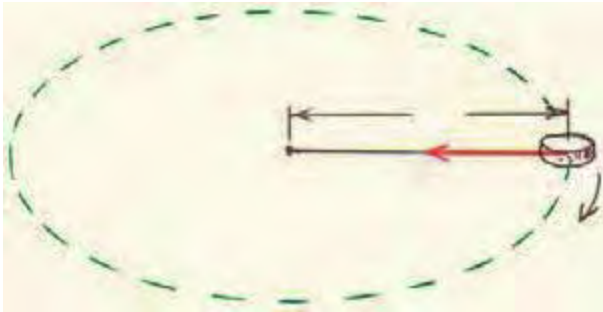
34. Párate con los talones y la espalda contra la pared y trata

de doblarte y tocarte los dedos de los pies. Descubrirás

que tienes que alejarte de la pared para hacerlo sin caer.

Compara la distancia mínima de tus talones con respecto

de la pared, con la de un amigo del sexo opuesto. ¿Quién



C A PÍ T U LO 8 R E V ISI Ó N

155

S U S T I T U Y E Y L I S T O *(F A M I L I A R I Z A C I Ó N C O N E C U A C I O N E S)* ***Momento de torsión*** *5* ***brazo de palanca*** *3* ***fuerza***

41. Calcula la fuerza de fricción que mantiene a una persona

de 80 kg sentada en el borde de una plataforma giratoria

38. Calcula el momento de torsión producido por una fuerza

horizontal cuando la persona se sienta a 2 m desde el centro

perpendicular de 50 N sobre el extremo de una llave de

de la plataforma y tiene una rapidez tangencial de 3 m/s.

0.2 m de largo.

39. Calcula el momento de torsión producido por la misma

Cantidad de movimiento angular *5* ***mvr***

fuerza de 50 N cuando la longitud de la llave se extiende

42. Calcula la cantidad de movimiento angular de la persona

con un tubo a 0.5 m.

en el problema anterior.

Fuerza centrípeta: F *5* ***mv2/ r***

43. Si la rapidez de una persona se duplica y todo lo demás

permanece igual, ¿cuál será la cantidad de movimiento

40. Calcula la tensión en una cuerda horizontal que gira un

angular de la persona?

juguete de 2 kg en un círculo de 2.5 m de radio cuando

se mueve a 3 m/s sobre una superficie helada.

P I E N S A Y R E S U E L V E *(A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 44. El diámetro de la base de un vaso inclinado mide*

consiste en un metro sostenido en el extremo de

6 cm. El diámetro de su boca es de 9 cm. La trayecto -

0 cm con un peso que cuelga de varias posiciones a lo

ria del vaso se curva cuando lo ruedas encima de una

largo del metro. Si el metro se sostiene horizontalmente,

mesa. ¿Cuál extremo, la base o la boca, rueda más

se produce momento de torsión cuando un objeto de 1 kg

rápido? ¿Cuánto más rápido?

cuelga de la marca de 50 cm. ¿Cuánto más momento de

torsión se ejerce cuando el objeto cuelga de la marca de

75 cm? ¿De la marca de 100 cm?

48. Un disco de hielo de masa m da vueltas sobre una

superficie helada en un círculo con rapidez v al final de

una cuerda horizontal de longitud L. La tensión en la

cuerda es T.

L

m

T

v

45. Para apretar un tornillo, empujas con una fuerza de 80 N en el extremo del mango de una llave que está a 0.25 m del eje del tornillo.

a. Escribe la ecuación de la fuerza centrípeta y sustituye los valores T y L correctamente. Luego, con un poco de álgebra elemental, reordena la ecuación de modo que se resuelva la masa.

b. Demuestra que la masa del disco es 5 kg cuando la longitud de la cuerda es 2 m, la tensión en la cuerda es de 10 N y la rapidez tangencial del disco es 2 m/s.

49. Si un artista del trapecio gira una vez cada segundo como se muestra en el dibujo. El metro tiene una masa de 1 kg. ¿Cuál debe ser la masa de la roca?

46. La roca y el metro se equilibran en la marca de 25 cm, del tornillo. Para lograr el mismo momento de torsión, demuestra que debes ejercer 200 N de fuerza.

a. ¿Qué momento de torsión ejerces?

b. Mueve tu mano hacia adentro para estar a sólo 0.10 m del eje del tornillo.

c. ¿Tus respuestas dependen de la dirección de tu empuje en relación con la dirección del mango de la llave?

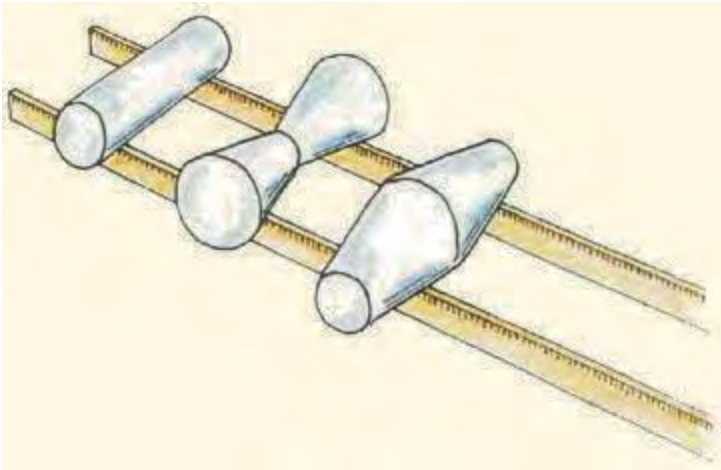
mientras pasea por el aire y se contrae para reducir su inercia rotacional a un tercio de lo que era, ¿cuántas rotaciones por segundo resultarán?

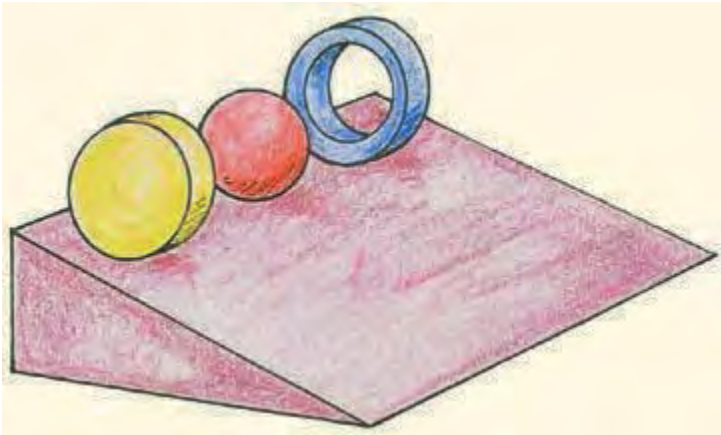
50. Un pequeño telescopio espacial en el extremo de una línea de sujeción de longitud L se mueve con rapidez lineal v alrededor de una estación espacial central.

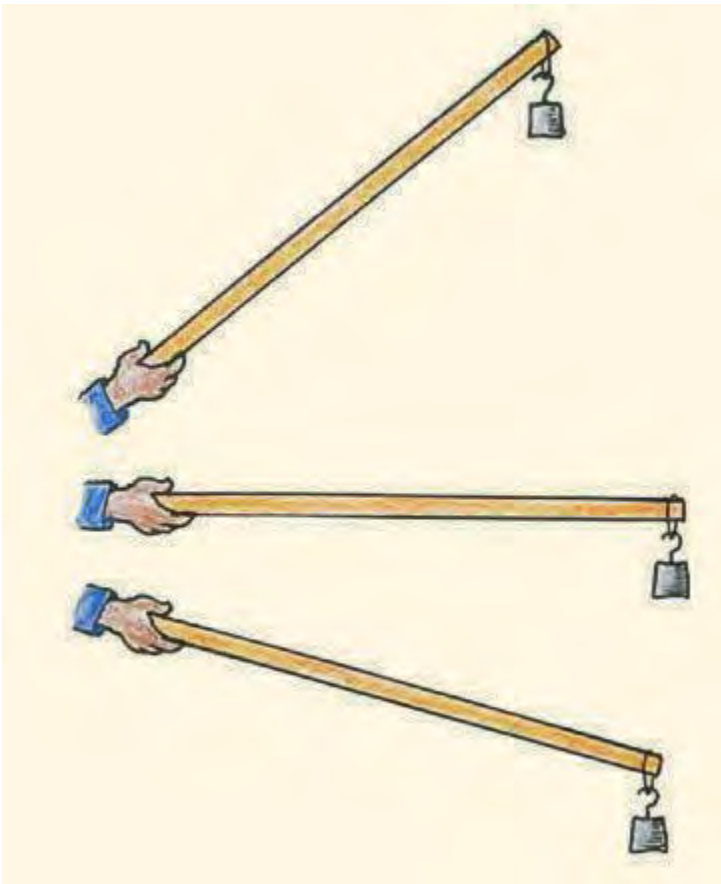
a. ¿Cuál será la rapidez lineal del telescopio si la longitud de la línea se reduce a 0.33 L?

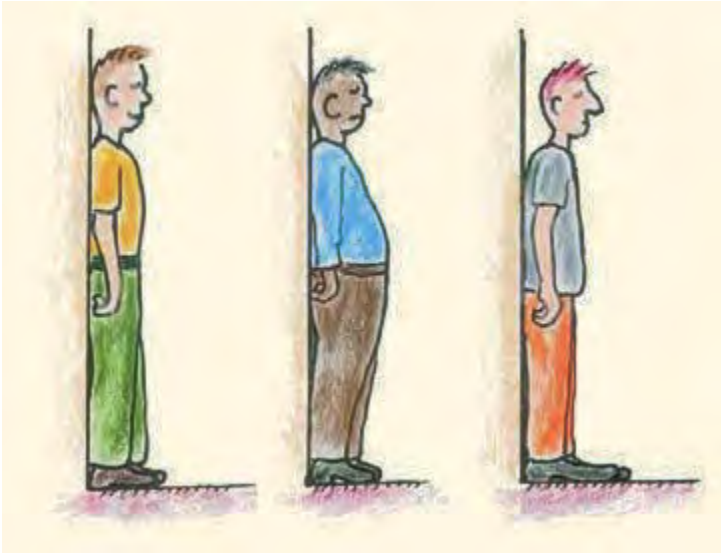
b. Si la rapidez lineal inicial del telescopio es 1.0 m/s,

47. En una de las fotografías al comienzo de este capítulo, ¿cuál es su rapidez cuando se jala hacia adentro a un Mary Beth usa un sensor de momento de torsión que tercio de su distancia inicial desde la estación espacial?









PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

51. Los tres vasos se ponen a rodar sobre una superficie horizontal. Clasifica los vasos por la cantidad que se alejan de una trayectoria en línea recta (de más curva a menos curva).

A

B

C

54. Sostén un metro con la misma masa suspendida en el extremo opuesto. Clasifica el momento de torsión necesario para mantener el metro estacionario, de mayor a menor.

52. Tres tipos de rodillos se colocan sobre vías fabricadas con metros paralelos ligeramente inclinados, como se muestra.

De mayor a menor, clasifica los rodillos en términos de su

capacidad para permanecer estables mientras ruedan.

A

B

C

A

B

C

55. Tres estudiantes de física con buena condición física

53. A partir de una posición de reposo, un disco sólido A,

están de pie con la espalda contra la pared. Su tarea es

una bola sólida B y un aro C corren por un plano

inclinarse y tocarse los dedos de los pies sin caer. Clasifica

inclinado. Clasifícalos en orden de llegada: ganador,

sus posibilidades de éxito de mayor a menor.

segundo lugar y tercer lugar.

C

B

A

A

B

C

***P I E N S A Y E X P L I C A** (S Í N T E S I S)*

56. Mientras viaja en una rueda de la fortuna, Sam Chungo

58. Usa la ecuación v 5 r para explicar por qué el extremo tontea y sale de su silla y avanza a lo largo del rayo de

de un matamoscas se mueve mucho más rápido que tu

modo que está a la mitad del eje. ¿Cómo se compara su

muñeca cuando aplastas una mosca.

rapidez rotacional con la de sus amigos que permanecen

59. Las ruedas de los ferrocarriles están inclinadas, una

en la silla? ¿Cómo se compara su rapidez tangencial? ¿Por

característica especialmente importante en las curvas.

qué tus respuestas son diferentes?

¿De qué manera, si la hay, la cantidad de inclinación se

57. Dan y Sue viajan en bicicleta con la misma rapidez. Las

relaciona con lo cerrado que pueden ser las curvas?

llantas de la bicicleta de Dan tienen un diámetro más

60. A menudo se observa que los flamencos se paran sobre

grande que las de la bicicleta de Sue. ¿Cuáles ruedas, si

una pata y alzan la otra. ¿Su inercia rotacional aumenta

alguna, tienen mayor rapidez rotacional?

con las patas largas? ¿Qué puedes decir acerca del centro

de masa del ave con respecto al pie sobre el cual se para?

C A PÍ T U LO 8 R E V ISI Ó N

157

61. Las ruedas delanteras de un vehículo de carreras se

75. ¿Dónde está el centro de masa de la atmósfera de la Tierra?

ubican muy lejos enfrente para ayudar a evitar que el

76. Con las ideas de momento de torsión y centro de

vehículo suba la nariz cuando acelera. ¿Qué conceptos

gravedad, explica por qué una bola rueda colina abajo.

físicos entran en juego aquí?

77. ¿Por qué es importante asegurar los archiveros al piso,

en especial aquellos con cargas pesadas en los cajones

superiores?

78. Describe las estabilidades comparativas de los tres objetos

62. ¿Cuál tendrá mayor aceleración al rodar hacia abajo de

que se muestran en términos de trabajo y energía potencial.

un plano inclinado: una bola de boliche o un balón

de vóleibol? Defiende tu respuesta.

63. Una pelota de softball y un balón de básquetbol parten

del reposo y ruedan por un plano inclinado. ¿Cuál bola

llegará primero al fondo? Defiende tu respuesta.

64. ¿El momento de torsión neto cambia cuando un compañero

79. Los centros de gravedad de los tres camiones estacionados

en un subibaja se pone de pie o se cuelga de su extremo en

en una colina se muestran con las X. ¿Cuál(es) camión(es)

lugar de sentarse? (¿Cambian el peso o el brazo de palanca?)

se volteará(n)?

?

65. ¿Una fuerza puede producir un momento de torsión

cuando no hay brazo de palanca?

80. Un automóvil de carreras sobre una pista circular plana

66. Cuando pedaleas una bicicleta, se produce máximo

necesita fricción entre las llantas y la pista para mantener

momento de torsión cuando los brazos del pedal están en

su movimiento circular. ¿Cuánta más fricción se necesita

posición horizontal y no se produce momento de torsión

para el doble de rapidez?

cuando están en posición vertical. Explica.

81. ¿Un objeto puede moverse por una trayectoria curva si no

actúa ninguna fuerza sobre él? Defiende tu respuesta.

82. A medida que un automóvil acelera cuando negocia una

curva, ¿la fuerza centrípeta sobre el automóvil también

aumenta? Defiende tu respuesta.

67. Cuando la línea de acción de una fuerza interseca el centro

83. Cuando estás en el asiento del pasajero de un automóvil que

de masa de un objeto, ¿dicha fuerza puede producir un

da vuelta a la izquierda, puedes sentirte presionado contra la

momento de torsión en torno al centro de masa del objeto?

puerta del lado derecho. ¿Por qué presionas contra la puerta?

¿Por qué la puerta presiona sobre ti? ¿Tu explicación tiene

68. Cuando una bola de boliche abandona tu mano, puede

que ver con una fuerza centrífuga o las leyes de Newton?

no girar. Pero más lejos en la bolera, sí gira. ¿Qué produce

el giro?

84. La fricción es necesaria para que un automóvil negocie

una curva. Pero, si el camino está peraltado, puede no

69. ¿Por qué sentarse más cerca del centro de un vehículo

necesitarse fricción en absoluto. ¿Qué proporciona,

proporciona el viaje más cómodo en un autobús que viaja

entonces, la fuerza centrípeta necesaria? (Sugerencia:

sobre un camino lleno de baches, en un barco en un mar

considera componentes vectoriales de la fuerza normal

picado o en un avión en aire turbulento?

sobre el automóvil.)

70. Si supones que tus pies no se mantienen abajo, ¿qué es

85. ¿Bajo qué condiciones un automóvil que se mueve

más difícil: hacer abdominales con las rodillas dobladas o

rápidamente podría permanecer en una pista peraltada

con las piernas estiradas?

cubierta con hielo resbaloso?

71. Explica por qué una pértiga larga es más conveniente

86. Explica por qué una fuerza centrípeta no realiza trabajo

para un funámbulo si la pértiga cuelga con laxitud.

sobre un objeto que se mueve circularmente.

87. La ocupante dentro de un hábitat espacial giratorio del

futuro siente que es empujada por gravedad artificial

contra la pared exterior del hábitat (que se convierte en

72. ¿Por qué debes doblarte hacia adelante cuando llevas una

el "piso"). Explica qué ocurre en términos de las leyes de

pesada carga sobre la espalda?

Newton y la fuerza centrípeta.

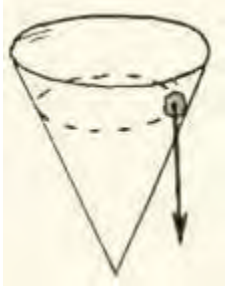
73. ¿Por qué el movimiento bamboleante de una sola estrella

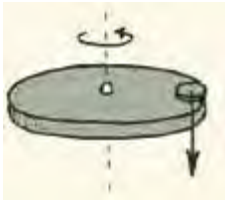
es indicio de que la estrella tiene uno o más planetas que

orbitan alrededor de ella?

74. ¿Por qué es más fácil transportar la misma cantidad de agua

en dos cubetas, una en cada mano, que en una sola cubeta?





88. El dibujo muestra una moneda en el

radial de la trayectoria circular de la bola. (Sí, ¡la normal es

borde de una tornamesa. El peso de la

mucho más grande que el peso!)

moneda se muestra con el vector ***W****. Otras*

93. Una cantidad considerable de suelo se barre hacia el río

dos fuerzas actúan sobre la moneda: la

W

Mississippi y se deposita en el Golfo de México cada año.

fuerza normal y una fuerza de fricción

¿Qué efecto tiene esta tendencia sobre la duración del

que impide que se deslice del borde. Dibuja los vectores de

día? (Sugerencia: relaciona esto con la Figura 8.52.)

fuerza para estas dos.

94. Si todos los habitantes de la Tierra se movieran hacia el

89. Un motociclista puede viajar sobre la pared vertical

ecuador, ¿cómo afectaría esto la inercia rotacional de la

de una pista con forma de tazón, como se muestra. La

Tierra? ¿Cómo afectaría la duración del día?

fricción de la pared sobre las llantas se muestra mediante

95. Estrictamente hablando, a medida que se construyen

el vector vertical rojo. (a) ¿Cómo se compara la magnitud

más rascacielos sobre la superficie de la Tierra, ¿el día

de este vector con el peso de la motocicleta y el piloto?

tiende a volverse más largo o más corto? Y, estrictamente

(b) ¿El vector horizontal rojo representa la fuerza normal

hablando, ¿la caída de las hojas de otoño tiende a alar-

que actúa sobre la motocicleta y el piloto, la fuerza

gar o a acortar el día de 24 horas? ¿Qué principio físico

centrípeta, ambas o ninguna? Defiende tu respuesta.

apoya tus respuestas?

96. Si la población del mundo se moviera hacia el Polo Norte

y el Polo Sur, ¿el día de 24 horas se volvería más largo,

más corto o permanecería igual?

97. Si las capas de hielo polar sobre la superficie sólida de la

Tierra se derritieran, los océanos serían más profundos.

Estrictamente hablando, ¿qué efecto tendría esto sobre la

rotación de la Tierra?

90. El dibujo muestra un péndulo cónico.

98. ¿Por qué un pequeño helicóptero común, con un solo rotor

La lenteja se balancea en una trayectoria

T

principal, tiene un segundo rotor

circular. La tensión ***T*** *y el peso* ***W***

pequeño en la cola? Describe la con-

se muestran con vectores. Dibuja un

secuencia si el rotor pequeño fal a en

paralelogramo con estos vectores y

pleno vuelo.

muestra que sus resultantes se encuentran

en el plano del círculo. (Consulta la regla

99. Se cree que nuestra galaxia se formó a partir de una enor-

W

del paralelogramo en el Capítulo 2.) ¿Cuál

me nube de gas. La nube original era mucho más grande

es el nombre de esta fuerza resultante?

que el tamaño actual de la galaxia, era más o menos esfé-

rica, y giraba mucho más lentamente de lo que hace ahora

91. Te sientas en el medio de una gran tornamesa en un

la galaxia. En este dibujo se ve la nube original y la galaxia

parque de diversiones cuando se la pone a girar y luego

como es ahora (vista desde el borde). Explica cómo el

se le deja girar libremente. Cuando te desplazas hacia el

tirón hacia adentro de la gravedad y la conservación de la

borde de la tornamesa, ¿la tasa de la rotación aumenta,

cantidad de movimiento angular contribuyeron a la forma

disminuye o permanece invariable? ¿Qué principio físico

actual de la galaxia y por qué ahora gira más rápido que

apoya tu respuesta?

cuando era una nube esférica más grande.

92. Considera una bola que rueda en una trayec-

toria circular en la superficie interior de un

Entonces

Ahora

cono. El peso de la bola se muestra mediante

el vector ***W****. Sin fricción, sólo otra fuerza*

actúa sobre la bola: una fuerza normal.

(a) Dibuja el vector de la fuerza normal. (La

W

longitud del vector depende del siguiente

100. La Tierra no es esférica, sino que tiene abultamientos en

paso, b.) (b) Con la regla del paralelogramo, demuestra que

el ecuador. Júpiter tiene más protuberancias. ¿Cuál es la

la resultante de los dos vectores es a lo largo de la dirección

causa de estos abultamientos?

P I E N S A Y D I S C U T E *(E V A L U A C I Ó N)*

101. El velocímetro de un

102. Una gran rueda se acopla a

automóvil está configu-

una rueda con la mitad de

rado para leer rapidez

diámetro, como se mues-

proporcional a la rapidez

tra en el dibujo. ¿Cómo se

rotacional de sus ruedas.

compara la rapidez rotacio-

Si las ruedas descomu-

nal de la rueda menor con

nales de este automóvil

la de la rueda más grande?

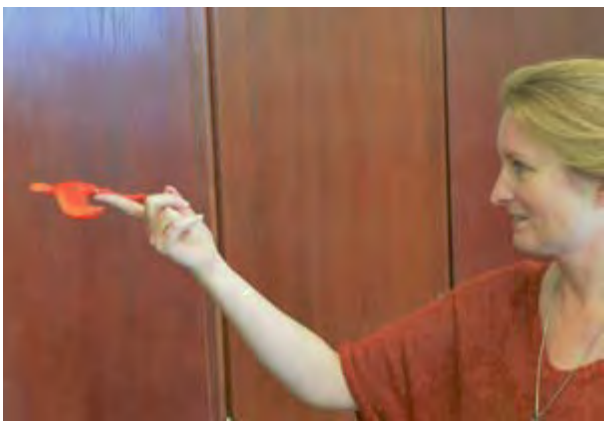
rojo se instalaran sin hacer correcciones al velocímetro,

Discute las comparaciones de las rapideces tangenciales en

discute si la lectura del velocímetro será mayor o menor,

los bordes (si supones que la banda no resbala).

o no cambiará.



103. En este capítulo aprendiste que un objeto puede no estar

en equilibrio mecánico aun cuando S F 5 0. Discute qué

ladrillo superior tenga el máximo desplazamiento hori-

más define el equilibrio mecánico.

zontal respecto del ladrillo inferior? Por ejemplo, apilar-

104. Cuando un automóvil cae por un risco gira hacia ade-

los como sugieren las líneas punteadas sería inestable

lante mientras cae. Para una mayor rapidez de salida

y los ladrillos caerían. (Sugerencia: comienza con el ladri-

del risco, discute si el automóvil girará más o menos.

llo superior y trabaja hacia abajo. En cada nivel, el CG

(Considera el tiempo que actúa el momento de torsión

de los ladrillos de arriba no debe extenderse fuera del

desbalanceado.)

extremo del ladrillo de soporte.)

?

?

112. ¿Cómo pueden apilarse los tres ladrillos de modo que el

113. Una larga pista equilibrada como un subibaja sostiene

una bola de golf y una bola de billar más masiva con un

105. Discute por qué un automóvil sube la nariz cuando ace-

resorte comprimido entre las dos. Cuando el resorte se

lera y baja la nariz cuando frena.

suelta, las bolas se alejan una de otra. ¿La pista se inclina

en sentido de las manecillas del reloj, contra las mane-

cillas del reloj o permanece en equilibrio conforme las bolas ruedan hacia afuera? ¿Qué principios usas para tu análisis y explicación?

106. Discute cómo una rampa te ayudaría a distinguir entre dos esferas del mismo peso con aspecto idéntico, una sólida y la otra hueca.

107. ¿Cuál rodará más rápido por un plano inclinado: una lata de agua o una lata de hielo? Discute y explica.

108. ¿Por qué se prefieren las ruedas ligeras en las carreras de

114. Con respecto al dedo de Diana, ¿dónde está el centro de bicicletas? Discute y explica.

masa del ave plástica? Discute cómo puede lograrse este equilibrio durante su fabricación.

109. Un joven que entró a una carrera de cajas de cartón (en la que vehículos de cuatro ruedas sin impulso ruedan desde el reposo por una colina) se pregunta si debe usar grandes ruedas masivas o unas ligeras. Además, ¿las ruedas deben tener rayos o ser sólidas? ¿Qué consejo le darías?

110. El carrete se jala en tres formas, como se muestra. Hay suficiente fricción para la rotación. ¿En qué dirección rodará el carrete en cada caso? Discute y explica.

115. Cuando una bala de cañón de largo alcance se dispara hacia el ecuador desde una latitud norte (o sur), aterriza al oeste de su longitud "pretendida". Analiza por qué esto

111. Nadie en el parque quiere jugar con el niño molestoso, es así. (Sugerencia: considera una pulga que salta desde así que hace un subibaja como el que se muestra para parte del camino hacia el borde exterior de una torname- poder jugar solo. Discute cómo hace esto.

sa giratoria.)

116. Con frecuencia se dice que la fuerza causa aceleración. Pero cuando Evan viajó en un trineo cohete en Bonnevi- lle Salt Flats, la sangre se forzó hacia la parte posterior de su cerebro y casi se desmaya. Analiza e identifica la causa

de esta fuerza.

Gravedad

2

9.1

La ley de gravitación universal

3

9.2

La constante de gravitación universal, G

9.3

Gravedad y distancia: la ley del inverso

al cuadrado

9.4

Peso e ingravidez

9.5

Mareas oceánicas

9.6

Campos gravitacionales

9.7

Agujeros negros

9.8

Gravitación universal

4

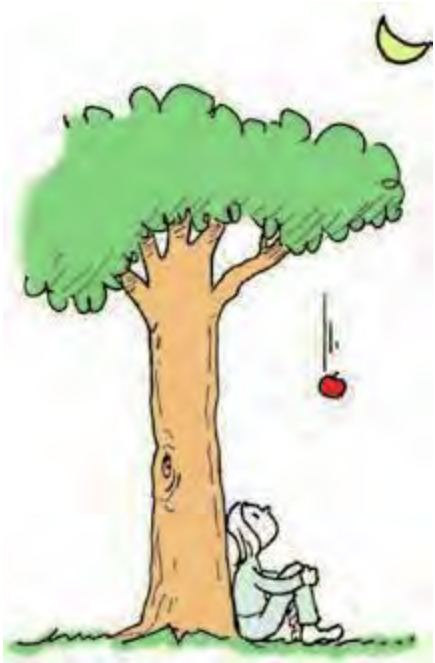
1 *Ed van den Berg pregunta a sus estudiantes: ¿dónde, entre*

la Tierra y la Luna, los campos gravitacionales de cada uno se

cancelan en cero? ***2*** *Contrario a lo que cree la mayoría de la gente, la fuerza gravitacional sobre el astronauta que realiza una caminata*

espacial es casi tan intensa como cuando está sobre la superficie de

la Tierra. Entonces, ¿por qué el astronauta no cae a la Tierra? En el Capítulo 10 verás que el astronauta, al igual que todos los satélites terrestres, cae continuamente alrededor de la Tierra. ***3*** *Eric Mazur logra el éxito pedagógico de involucrar a sus alumnos en discusiones en clase.* ***4*** *Tomas Brage utiliza un modelo didáctico de un aparato de Cavendish para medir G.*



C A C

P H

Í TA

UPLT ER

O 9 9

G G

R R AV

AV E I T

DA Y

D

161

1

los compañeros), un libro lleno

de ingeniosas preguntas en un

Eric Mazur, un carismático y prominente físico de la

Universidad de Harvard, es conocido por sus aporta-

ciones al estudio de la física óptica. Entre los educado-

formato de opción múltiple, con

res se le conoce mejor por su método didáctico de involucrar a

diagramas adecuados, para edu-

sus alumnos universitarios de física en debates dentro de gran-

cadores de todas partes. El autor

des salones de clases. Consigue estructurar los debates estu-

tuvo el gusto de utilizar las pre-

diantiles e incorporarlos en sus disertaciones. Hace años, en

guntas de Eric con sus grupos de

clases múltiples de 300 o más estudiantes no específicamente

estudiantes de ciencia e ingenie-

de ciencias, en el City Col ege de San Francisco, el autor de

ría justo antes de su jubilación.

este libro incorporó las discusiones estudiantiles en sus clases.

Dichas preguntas ayudaron a

"Examina a tu compañero" era su tarjeta de presentación. que las discusiones estudiantiles Antes de introducir nuevo material, el autor planteaba pre-fueran las mejores que hubiese experimentado.

guntas de respuesta corta y animaba a los alumnos a revisar

Eric Mazur ahora imparte un curso de introducción a la

sus razonamientos con los compañeros de clase que estaban

física que incluye trabajo en equipo y proyectos. Los estu-

a su alrededor. La experiencia demostró que los estudiantes diantes trabajan en equipos de cuatro o cinco en proyectos de recordaban mejor lo que decían, no lo que pensaban. La meta

seis meses. ¡Este curso de cálculo no tiene ni conferencias ni

del autor era hacer que los alumnos verbalizaran la física que

exámenes! La idea es crear un ambiente donde los alumnos se

aprendían.

hagan cargo de su aprendizaje. No estudian para aprobar el

Y así es hasta el día de hoy con Eric Mazur. Sin estar ente-

examen; en vez de el o, estudian para aprender cómo terminar

rado del éxito del autor con las discusiones estudiantiles en el proyecto. Esto es catalizador de aprendizaje, un sistema de grandes salones de clases, él elaboró su propio método de valoración basado en la nube que proporciona realimentación

"Examina a tu compañero". Plantear preguntas a los estudian-

instantánea a los instructores y ayuda a los estudiantes a invo-

tes es una cosa; otra cosa es formular preguntas que intriguen a

lucrarse de una manera más efectiva con sus compañeros. Si

los alumnos, preguntas que propicien la comprensión de con-

alguna vez entraras en su salón de clase, verías a los estudiantes

ceptos, preguntas que permitan distinguir entre casi saber la

ocupados planeando una misión a Marte o tratando de encon-

respuesta y comprenderla. ¡Eric Mazur fue y es experto en eso!

trar formas de utilizar la electricidad estática para resolver un

Él dio un paso más y publicó Peer Instruction (Enseñanza de

problema ambiental. Sí, ¡la física puede ser divertida!

***9.1** La ley de gravitación universal*

Desde la época de Aristóteles, el movimiento circular de los cuerpos celestiales se consideraba natural. Los antiguos creyeron que las estrellas, los planetas y la Luna se movían en círculos divinos. En lo que respecta a los antiguos, este movimiento circular no requería explicación. De acuerdo con la leyenda popular, Isaac Newton estaba sentado bajo un manzano cuando lo golpeó la idea de que lo que jala a las manzanas de los árboles es la misma fuerza que mantiene a la Luna dando vueltas a la Tierra. Una fuerza de gravedad puede explicar el movimiento de los planetas. Otras personas de su época, influidos por Aristóteles, suponían que cualquier fuerza sobre un planeta estaría dirigida a lo largo de su trayectoria. No obstante, Newton razonó que la fuerza sobre cada planeta se dirigiría hacia un punto central fijo: el Sol. El golpe de intuición de Newton, que la fuerza entre la Tierra y una manzana es la misma fuerza que jala lunas y planetas y todo lo demás en el Universo, fue un rompimiento revolucionario con la noción prevaleciente de que había dos conjuntos de leyes naturales: una para los eventos terrestres y otra, completamente diferente, para el movimiento en los cielos. Esta unión de leyes terrestres y leyes cósmicas se llamó síntesis newtoniana.

Para comprobar su hipótesis de que la gravedad de la Tierra llega a la Luna, Newton comparó la caída de una manzana con la "caída" de la Luna. Se dio cuenta de que la Luna cae en el sentido de que cae alejándose de la línea recta que seguiría si no hubiera fuerzas que actuaran sobre ella. Debido a su velocidad tangencial, "cae"

alrededor de la Tierra (en el siguiente capítulo se hablará más acerca de esto). Por simple geometría, la distancia de caída por segundo de la Luna podía compararse con la distancia que una manzana o cualquier cosa así de alejada caería en un segundo. ***F I G U R A 9 .1***

Los cálculos de Newton no concordaban. Desilusionado, pero reconociendo que el ¿El tirón gravitacional sobre la manzana dato bruto siempre debe ganar sobre una hermosa hipótesis, colocó sus escritos en un podría llegar a la Luna?

cajón donde permanecieron casi 20 años. Durante este periodo fundó y desarrolló el campo de la óptica, por el cual se volvió famoso.

El interés de Newton en la mecánica se reavivó con la aparición de un espectacular La velocidad tangencial de un

cometa en 1680, y otro, 2 años después. Regresó al problema de la Luna gracias al es-planeta o luna que se mueve en un

tímulo de su amigo astrónomo Edmund Halley, en cuyo honor se nombró después el círculo está en ángulo recto con

respecto a la fuerza de gravedad

segundo cometa. Newton hizo correcciones a los datos experimentales utilizados en su método anterior y obtuvo excelentes resultados. Sólo entonces publicó lo que constituye una de las generalizaciones de mayor alcance de la mente humana: la ***ley de gravitación universal****.1*

Todo jala sobre todo lo demás en una forma hermosamente sencilla que

sólo involucra masa y distancia. De acuerdo con Newton, todo cuerpo atrae a todos los demás cuerpos con una fuerza que, para cualesquiera dos cuerpos, es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre sus centros. Este enunciado puede expresarse como:

×

Fuerza masa1 masa2

 distancia2

O, en forma simbólica,

m m

F

1 2

 d 2

donde m 1 y m 2 son las masas de los cuerpos y d es la distancia entre sus centros. Por tanto, cuanto mayores sean las masas m 1 y m 2, mayor será la fuerza de atracción entre ellas, en proporción directa a las masas.2 Cuanto mayor sea la distancia de separación d, más débil será la fuerza de atracción, en proporción inversa al cuadrado de la distancia entre sus centros de masa.

v

P U N T O D E C O N T R O L

1. En la Figura 9.2 se ve que la Luna cae alrededor de la Tierra en lugar de hacerlo directo hacia ella. Si la velocidad tangencial de la Luna fuera cero,

¿cómo se movería?

2. De acuerdo con la ecuación de la fuerza gravitacional, ¿qué ocurre con la fuerza entre dos cuerpos si la masa de uno de los cuerpos se duplica? ¿Si ambas masas se duplican?

3. La fuerza gravitacional actúa sobre todos los cuerpos en proporción a sus masas. ¿Por qué, entonces, un cuerpo pesado no cae más rápido que un cuerpo ligero?

F I G U R A 9 . 2

La velocidad tangencial de la Luna en

torno a la Tierra le permite caer alre-

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

dedor de la Tierra en lugar de directo

1. *¡La Luna caería directo hacia abajo y chocaría con la Tierra!*

hacia ella. Si esta velocidad tangencial se

2. *Cuando una masa se duplica, la fuerza entre ella y la otra masa se duplica. Si redujera a cero, ¿cuál sería el destino de*

ambas masas se duplican, la fuerza es cuatro veces mayor.

la Luna?

3. *La repuesta remite al Capítulo 4. Recuerda la Figura 4.12, en la que los ladrillos pesado y ligero caen con la misma aceleración porque ambos tienen la misma proporción entre peso y masa. La segunda ley de Newton (a 5 F/ m) te recuerda que una mayor fuerza que actúa sobre una mayor masa no resulta en una mayor aceleración.*

1Éste es un ejemplo exagerado del esfuerzo esmerado y la verificación que exige la formulación de una teoría científica. Compara el método de Newton y la manera como otros suelen defender teorías poco científicas sin

"hacer su tarea", con juicios apresurados y sin hacer una verificación de sus pronunciamientos.

2Observa aquí la función diferente de la masa. Hasta el momento, la masa se ha tratado como una medida de inercia, que se llama masa inercial. Ahora se considera a la masa como una propiedad que afecta a la fuerza gravitacional, que en este contexto se llama masa gravitacional. De manera experimental se estableció que las dos son iguales y, como cuestión de principio, la equivalencia de la masa inercial y la gravitacional es el fundamento de la teoría de la relatividad general de Einstein.

C A PÍ T U LO 9 GR AV EDA D

163

9.2 *La constante de gravitación universal, G*

La forma de proporcionalidad de la ley de gravitación universal puede expresarse como una ecuación exacta cuando se introduce la constante de proporcionalidad G. G se llama constante de gravitación universal.

Entonces la ecuación es: m m

F = G 1 2

d 2

Las unidades de G hacen que la fuerza aparezca en newtons. La magnitud de G es la misma que la fuerza gravitacional entre dos masas de 1 kilogramo que están separadas 1 metro: 0.0000000000667 newton. De modo que:

G 6.67 10–11 N·m2/kg2

F I G U R A 9 . 3

A medida que el cohete se aleja más de la

Éste es un número extremadamente pequeño.3 Muestra que la gravedad es una fuerza Tierra, disminuye el tirón gravitacional muy débil comparada con las fuerzas eléctricas. La gran fuerza gravitacional neta que sien- de cada uno sobre el otro.

tes como peso se debe al enorme número de átomos en el planeta Tierra que jalan sobre ti.

Es interesante que Newton pudiera calcular el producto de G y la masa de la Tierra, pero ninguno de los dos por separado. El cálculo de G de forma aislada lo hizo por primera vez el físico inglés Henry Cavendish en 1798, más de 70 años después de la muerte de Newton.

Así como una partitura guía a un

Para medir G Cavendish midió la pequeña fuerza entre masas de plomo con una ba-músico para interpretar música, las

lanza de torsión extremadamente sensible, como muestra el profesor Brage en una de las ecuaciones guían a un estudiante

fotografías al comienzo de este capítulo. Un método más sencil o lo desarrol ó después de física que intenta entender

cómo se conectan los conceptos.

Philipp von Jol y, quien unió un matraz esférico de mercurio a un brazo de una balanza sensible (Figura 9.4). Después de que la balanza se ponía en equilibrio, una esfera de plomo de 6 ton rodaba abajo del matraz de mercurio. La fuerza gravitacional entre las dos masas se midió por el peso

necesario en el extremo opuesto de la balanza para restaurar el equilibrio.

Todas las cantidades, m 1, m 2, F y d, eran conocidas, de lo cual se calculó la constante G: ***VIDEO: Método de von Jolly para***

=

F

=

11

N

.

6 67 ×

−

10

= .

6 67 ×

−

G

10 11N ·m2 / kg2

medir la atracción entre dos masas

(m m

2

2

1 2)

kg / m

(d 2)

El valor de G muestra que la gravedad es la más débil de las cuatro fuerzas

fundamentales conocidas en la actualidad. (Las otras tres son la fuerza electromagnética y los dos tipos de fuerzas nucleares.) La gravitación sólo se siente cuando están involucradas masas como la de la Tierra. Si estás de pie en un buque, la fuerza de atracción entre tú y el barco es muy débil para una medición ordinaria. Sin embargo, la fuerza de atracción entre tú
SCREENCAST: Gravedad

y la Tierra puede medirse: es tu peso. Tu peso depende no sólo de tu masa, sino también de tu distancia respecto del centro de la Tierra. En lo alto de una montaña, tu masa es la misma que en cualquier otra parte, pero tu peso es un poco menor que a nivel del mar.

Esto se debe a que tu distancia respecto del centro de la Tierra es mayor.

Una vez conocido el valor de G la masa de la Tierra se calculó con facilidad. La fuerza F

que la Tierra ejerce sobre una masa de 1 kg en su superficie es 10 N (con mayor precisión, m 1

9.8 N). La distancia entre la masa de 1 kg y el centro de la Tierra es el radio de la Tierra, m m

d

6.4 3 106 m. Por tanto, a partir de F = G 1 2 , donde m d 2

1 es la masa de la Tierra,

m 2

−

×

11

2

2

1 kg

m

.

9 8 N = .

6 67 × 10 N·m / kg

1

.

6 4 × 106 m 2

(

)

lo que conduce a m 1 5 6 3 1024 kg.

F I G U R A 9 . 4

Método de Jolly para medir G. Las bolas

de masa m y m se atraen mutuamente

1

2

3El valor numérico de G depende por completo de las unidades de medición que elijas para la masa, la distancia con una fuerza F proporcionada por

y el tiempo. El sistema internacional de elección es: para la masa, el kilogramo; para la distancia, el metro, y para los pesos necesarios para restaurar el

el tiempo, el segundo. En el Apéndice A al final de este libro se discute la notación científica.

equilibrio.

PA R T E U N O

M EC Á N I C A

En el siglo XVIII, cuando G se midió por primera vez, la gente en todo el mundo se emocionó mucho. Eso fue porque los periódicos de todas partes anunciaron el descubrimiento como uno en el que se medía la masa del planeta Tierra. Qué Así como p relaciona la circunfe-emocionante que la ecuación de Newton proporcionara la masa de todo el planeta, rencia y el diámetro de un círculo,

con todos sus océanos, montañas y zonas recónditas aún por descubrir. El cálculo G relaciona la fuerza gravitacional

de G y de la masa de la Tierra ocurrió cuando una gran parte de la superficie de la con la masa y la distancia.

Tierra todavía estaba sin explorar.

P U N T O D E C O N T R O L

Si existe una fuerza de atracción entre todos los objetos, ¿por qué no te sientes gravitar hacia los edificios masivos de tu vecindario?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Sin duda la gravedad jala hacia los edificios masivos y todo lo demás en el Uni-

¡Nunca puedes cambiar sólo una

verso. Las fuerzas entre los edificios y tú son relativamente pequeñas porque sus cosa! Toda ecuación te lo recuerda:

masas son pequeñas comparadas con la masa de la Tierra. Las fuerzas debidas a las no puedes cambiar un término en

estrellas son extremadamente pequeñas por las grandes distancias que las separan un lado sin afectar el otro lado.

de ti. Estas pequeñas fuerzas escapan a tu percepción cuando son superadas por la abrumadora atracción hacia la Tierra. El físico Paul A. M. Dirac, Premio Nobel 1933, lo dijo de esta forma: "¡corta una flor en la Tierra y moverás la estrella más lejana!".

***9.3** Gravedad y distancia:*

la ley del inverso al cuadrado

Puedes comprender mejor cómo se debilita la gravedad con la distancia si piensas cómo la pintura de una lata se dispersa con la distancia (Figura 9.5). Imagina que colocas un aerógrafo en el centro de una esfera con un radio de 1 metro y un chorro de rocío de pintura viaja 1 m para producir un parche cuadrado de pintura que mide 1 mm de grosor. ¿Cuán grueso sería el parche si el experimento se reali-VIDEO: Ley del inverso

zara en una esfera con el doble de radio? Si la misma cantidad de pintura viaja en ***al cuadrado***

líneas rectas 2 m, se dispersará en un parche el doble de alto y el doble de ancho.

Entonces la pintura se dispersaría sobre un área cuatro veces mayor y su grosor sería solamente de 1/4 mm.

¿Puedes ver en la figura que, para una esfera de 3 m de radio, el grosor del

parche de pintura será solamente 1/9 mm? ¿Puedes ver que el grosor de la pintura disminuye a medida que aumenta el cuadrado de la distancia? Esto se conoce 4 unidades de distancia

3 unidades de distancia

2 unidades

de distancia

1 unidad de

distancia

Lata de pintura

1 unidad

4 unidades ( ) unidades ( ) unidades

de área

de área

de área

de área

Rocío de

1 grosor

grosor

1

( ) grosor

( ) grosor

pintura

de la capa de la capa

4

de la capa

de la capa

F I G U R A 9 . 5

La ley del inverso al cuadrado. El rocío de la pintura se aleja radialmente de la boquilla de la lata en líneas rectas. Al igual que la gravedad, la "fuerza" del aerosol obedece la ley del inverso al cuadrado.

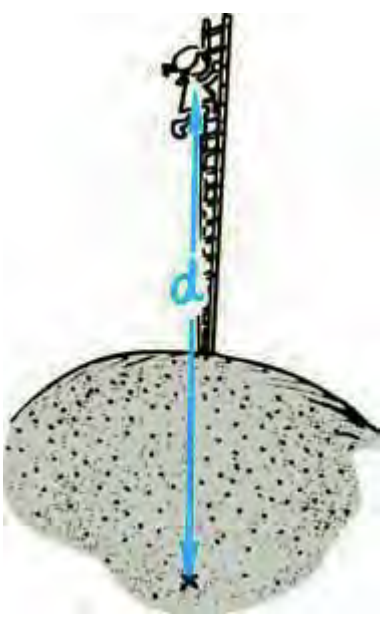


FIGURA 9.6

Si una manzana pesa 1 N en la superficie de la Tierra, pesaría solamente 1/4 N al doble de distancia del centro de la Tierra. A 3 veces la distancia, pesaría sólo 1/9 N. La fuerza gravitacional contra la distancia se indica en color. ¿Cuál sería el peso de la manzana a 4 veces la

Fuerza gravitacional

distancia? ¿A cinco veces la distancia?

1 d

2 d

3 d

4 d

5 d

Una Una manzana

Distancia

manzana

pesa

pesa

1

Una manzana

4

N aquí

pesa ( ) N aquí

1 N aquí

1

Fuerza gravitacional ~ d 2

como ***ley del inverso al cuadrado****. La ley del inverso al cuadrado se sostiene para la gravedad y para todos los fenómenos en los que el efecto de una fuente localizada se dispersa de manera uniforme por el espacio circundante: el campo eléctrico en torno a un electrón aislado, la luz de un fósforo, la radiación de un trozo de uranio y el sonido de un grillo.*

La ley de gravitación de Newton como se escribió se aplica a partículas y cuerpos esféricos, así como a cuerpos no esféricos suficientemente separados. El término de distancia d en la ecuación de Newton es la distancia entre los centros de masas de los objetos. Observa en la Figura 9.6 que la manzana que normalmente pesa 1 N en la superficie de la Tierra pesa solamente 1/4 de ello cuando está al doble de distancia del centro de la Tierra. Cuanto mayor sea la distancia respecto del centro de la Tierra, menor será el peso de un objeto. Un niño que pesa 300 N a nivel del mar sólo pesará 299 N en la cima del monte Everest. Para distancias mayores, la fuerza es menor. Para distancias muy grandes, la fuerza gravitacional de la Tierra tiende a cero. La fuerza tiende a cero mas nunca llega a cero. Incluso si fueras transportado a los confines lejanos del Universo, el campo gravitacional de casa aún seguiría contigo. Puede ser superado por los campos gravitacionales de cuerpos más cercanos o más masivos, pero está ahí. El campo gravitacional de todo objeto material, no importa cuán pequeño o cuán lejano, se extiende por todo el espacio.

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿En cuánto disminuye la fuerza gravitacional entre dos objetos cuando la distancia entre sus centros se duplica? ¿Triplica? ¿Aumenta 10 veces?

2. Considera una manzana en lo alto de un árbol sobre el que jala la gravedad de la Tierra con una fuerza de 1 N. Si el árbol fuera el doble de alto, ¿la fuerza de gravedad será ¼ de intensa? Defiende tu respuesta.

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Disminuye a 1/4, 1/9 y 1/100 el valor original.*

2. *No, porque una manzana en lo alto de un árbol el doble de alto no está el doble de alejado del centro de la Tierra. El árbol más alto necesitaría una altura igual al radio de la Tierra (6,370 km) para que el peso de la manzana que está en su cima se redujera a ¼ N. Antes de que su peso disminuya 1%, una manzana o cualquier objeto* ***F I G U R A 9 . 7***

deben elevarse 32 km, casi cuatro veces la altura del monte Everest. De modo que, De acuerdo con la ecuación de Newton,

con fines prácticos, se ignoran los efectos de los cambios cotidianos de elevación.

el peso de la niña (no su masa) disminuye

a medida que ella aumenta su distancia

con respecto al centro de la Tierra.

9.4 *Peso e ingravidez*

Peso

La fuerza de gravedad, como cualquier fuerza, puede producir aceleración. Los objetos bajo la influencia de la gravedad aceleran los unos hacia los otros. Puesto que tú casi siempre estás en contacto con la Tierra, la gravedad te es más familiar como algo que te presiona contra la Tierra en lugar de como algo que te acelera. La presión contra la Tierra es la sensación que interpretas como ***peso****.*

Párate sobre una báscula colocada en un suelo estacionario. La fuerza gravitacional Fuerza

entre tú y la Tierra te jala contra el suelo de apoyo y la báscula. De acuerdo con la terce-de sostén

ra ley de Newton, al mismo tiempo, el suelo y la báscula te empujan hacia arriba. Entre tú y el suelo hay un dispositivo similar a un resorte en el interior de la báscula que está ***F I G U R A 9 . 8***

calibrado para mostrar tu peso (Figura 9.8, que es idéntica a la anterior Figura 4.6). Si Cuando te subes a una báscula, dos

repites este procedimiento de pesado en un elevador en movimiento, variará la lectura fuerzas actúan sobre ella: una fuerza desde tu peso: no durante el movimiento estable, sino durante el movimiento acelerado.

cendente de la gravedad, mg, y una fuerza Si el elevador acelera hacia arriba, la báscula y el suelo empujan más fuerte contra tus de sostén

ascendente. Estas dos fuerzas

son iguales y opuestas cuando no ocurre

pies. De modo que la compresión de los resortes dentro de la báscula es mayor. La bás-aceleración, y oprimen un dispositivo

cula muestra un aumento de tu peso. Sin embargo, si el elevador acelera hacia abajo, similar a un resorte dentro de la báscula

ocurre lo contrario y la báscula muestra una reducción de tu peso.

que está calibrado para mostrar tu peso.

En los Capítulos 2 y 4, el peso de un objeto se consideró generalmente como la fuerza de la gravedad que jala sobre él. Cuando un objeto está en equilibrio sobre una superficie firme, su peso se evidencia por una fuerza de sostén o, cuando está en suspensión, por una tensión en la soga de soporte. En cualquier caso, sin aceleración, Los astronautas en el interior de

el peso es igual a mg. Sin embargo, cuando estudiaste los ambientes giratorios en el un vehículo espacial en órbita no

Capítulo 8, aprendiste que puede haber una fuerza de sostén sin importar la grave-tienen peso, aun cuando la fuerza

dad. De modo que una definición más amplia del peso experimentado por algo es la de gravedad entre ellos y la Tierra

fuerza que ejerce contra una superficie de sostén. De acuerdo con esta definición, tú eres sea sólo un poco menor que a nivel

tan pesado como te sientes. De este modo, en un elevador que acelera hacia abajo, la del suelo.

fuerza de apoyo del suelo es menor y tú pesas menos. Si el elevador está en caída libre, la fuerza de sostén y la lectura sobre la báscula son cero. De acuerdo con la lectura, estás ***ingrávido*** *(sin peso) (Figura 9.9). Sin embargo, incluso en esta condición de ingravidez todavía hay una fuerza gravitacional que actúa sobre ti, lo que causa tu aceleración hacia abajo. Pero ahora la gravedad no se siente como peso porque no hay fuerza de sostén.*

VIDEO: Ingravidez aparente

F I G U R A 9 . 9

Tu peso es igual a la fuerza con la que

presionas contra el suelo de apoyo. Si el

suelo acelera hacia arriba o hacia abajo,

tu peso varía (aun cuando la fuerza

gravitacional mg que actúa sobre ti

permanezca igual).

Mayor que

peso normal

Menor

que peso normal

Peso

normal

Peso

cero

VIDEO: Peso e ingravidez

Los astronautas en órbita están sin una fuerza de apoyo. Están en un estado sostenido de ingravidez, que no es la ausencia de gravedad, sino la ausencia de una fuerza de sostén. En ocasiones los astronautas experimentan "mareo espacial" hasta que se acostumbran a un estado de ingravidez sostenida. Los astronautas en órbita están en un estado de caída libre continua.

La Estación Espacial Internacional que se muestra en la Figura 9.11 proporciona un ***SCREENCAST: Peso/ingravidez***

ambiente de ingravidez. Las instalaciones de la estación y los astronautas aceleran de igual modo hacia la Tierra, a un poco menos que 1 g debido a su altitud. Esta aceleración

C A PÍ T U LO 9 GR AV EDA D

F I G U R A 9 . 1 0

F I G U R A 9 . 1 1

Estos astronautas están en caída libre. Se sienten ingrávidos

Los habitantes de esta instalación de laboratorio y acoplamiento

porque no presionan contra algo que les proporcione una fuerza

continuamente experimentan ingravidez. Están en caída libre

de apoyo.

alrededor de la Tierra. ¿Sobre ellos actúa una fuerza de gravedad?

no la perciben en absoluto; con respecto a la estación, los astronautas experimentan 0 g. Durante periodos prolongados, esto causa pérdida de tono muscular y otros cambios perjudiciales en el cuerpo. Sin embargo, los viajeros espaciales del futuro no necesitarán estar sujetos a ingravidez. Como se mencionó en el Capítulo 8, es probable que gigantescas ruedas o cápsulas que giren de manera lenta en el extremo de una cuerda de sujeción tomen el lugar de los actuales hábitats espaciales no giratorios. La rotación efectivamente proporciona una fuerza de soporte y brinda peso bastante bien.

P U N T O D E C O N T R O L

¿En qué sentido el estar a la deriva en el espacio, lejos de todo cuerpo celeste, es parecido a caer de una escalera?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

En ambos casos experimentas ingravidez. Al ir a la deriva en el espacio profundo, permaneces ingrávido porque ninguna fuerza discernible actúa sobre ti. Al caer de una escalera, sólo momentáneamente estás ingrávido, debido a una momentánea ***F I G U R A 9 . 1 2***

falta de fuerza de sostén.

Ambos están ingrávidos.

9.5 *Mareas oceánicas*

Las personas que viajan por mar siempre han sabido que hay una relación

entre las mareas oceánicas y la Luna, pero ninguna podría ofrecer una teoría satisfactoria que explique las dos mareas altas por día. Newton produjo la explicación: las mareas oceánicas son causadas por diferencias en el tirón gravitacional entre la Luna y la Tierra sobre lados opuestos de la Tierra. La fuerza gravitacional entre la Luna y la Tierra es más fuerte en el lado de la Tierra más cercano a la Luna, y es más débil en el lado de la Tierra que está más lejos de la Luna. Esto es simplemente porque la fuerza gravitacional es más débil con la distancia creciente.

F I G U R A 9 . 1 3

Mareas oceánicas.

Marea baja

Marea alta

Para comprender por qué estos diferentes tirones producen mareas, observa una pelota de gelatina (Figura 9.14). Si ejerces la misma fuerza sobre cada parte de la pelota, la pelota permanecería perfectamente redonda mientras acelera. Pero si tiras más fuerte de un lado que del otro, los diferentes tirones estirarán la pelota. Eso es lo que ocurre con esta gran bola sobre la que vives. Diferentes tirones de la Luna estiran la Tierra, de manera más notable en sus océanos. Este estiramiento es evidente en los abultamientos oceánicos en lados opuestos de la Tierra. Por tanto, se experimentan dos conjuntos de mareas oceánicas por día: dos mareas altas y dos mareas bajas.

En promedio mundial, los abultamientos oceánicos están casi 1 m arriba

del nivel superficial promedio del océano. La Tierra gira una vez al día, de modo que ***F I G U R A 9 . 1 4***

un punto fijo sobre la Tierra pasa bajo estos dos abultamientos cada día. Esto pro-Una pelota de gelatina permanece

duce dos conjuntos de mareas oceánicas por día. Cualquier parte de la Tierra que esférica cuando todas las partes se jalan

pasa por abajo de uno de los abultamientos tiene una marea alta. Cuando la Tierra igualmente en la misma dirección.

realiza un cuarto de vuelta 6 horas después, el nivel del agua en la misma parte del Cuando un lado se jala más que el otro,

océano está casi 1 m abajo del nivel marino promedio. Ésta es la marea baja. El la pelota se estira.

agua que "no está ahí" está bajo los abultamientos que constituyen las mareas altas.

Un segundo abultamiento de marea alta se experimenta cuando la Tierra da otro cuarto de vuelta. De modo que se tienen dos mareas altas y dos mareas bajas diariamente. Es interesante que mientras la Tierra gira, la Luna se mueve en su órbita y aparece en la misma posición en el cielo cada 24 horas y 50 minutos, de modo ***SCREENCAST: Mareas oceánicas***

que el ciclo de dos mareas altas en realidad se produce a intervalos de 24 horas y 50

minutos. Es por esto que las mareas no ocurren al mismo tiempo cada día.

F I G U R A 9 . 1 5

Los dos abultamientos de marea produ-

cidos por las diferencias en los tirones

gravitacionales permanecen relativamen-

te fijos en relación con la Luna, mientras

que la Tierra gira diariamente bajo ellos.

El Sol también contribuye a las mareas oceánicas, pero es aproximadamente la mitad de efectivo que la Luna para elevar mareas, aun cuando el tirón del Sol sobre la Tierra es 180 veces más fuerte que el

tirón de la Luna sobre la Tierra. Entonces, ¿por qué las mareas debidas al Sol no son 180 veces mayores que las mareas debidas a la Luna?

Debido a que el Sol está a una mayor distancia, la diferencia en tirones gravitacionales Fuerza

sobre lados opuestos de la Tierra es muy pequeña. En otras palabras, el Sol jala casi tan fuerte sobre el lado lejano de la Tierra que sobre el lado cercano . 4

F

Cuando el Sol, la Tierra y la Luna se alinean, las mareas debidas al Sol y la Luna coinciden. Entonces se tienen mareas altas más altas que el promedio y mareas bajas F

más bajas que el promedio. A éstas se les conoce como ***mareas vivas o de sicigia*** *(Figura 9.17). (Las mareas vivas o de sicigia no tienen nada que ver con la primavera.)**

Es posible decir cuándo están alineados el Sol, la Tierra y la Luna gracias a la Luna Distancia

llena o a la Luna nueva. Cuando la Luna es llena, la Tierra está entre el Sol y la Luna. (Si los tres están exactamente en línea, entonces se tiene un eclipse lunar, pues la Luna llena pasa por la sombra de la Tierra.) Una Luna nueva ocurre cuando la Luna está entre el Sol y la Tierra, cuando el hemisferio no iluminado de la Luna da ***F I G U R A 9 . 1 6***

la cara a la Tierra. (Cuando este alineamiento es perfecto, la Luna bloquea al Sol y Gráfica de fuerza gravitacional contra

se tiene un eclipse solar.) Las mareas vivas ocurren en épocas de Luna nueva o llena.

distancia (no a escala). Cuanto mayor

sea la distancia respecto del Sol, menor

será la fuerza F, que varía como 1/ d 2 y

4Newton dedujo que las diferencias en los jalones de las mareas disminuyen como el cubo de la distancia entre los menor la diferencia en tirones gravi-centros de los cuerpos. En consecuencia, sólo distancias relativamente cercanas resultan en mareas apreciables.

tacionales sobre lados opuestos de un

**N.T. El término en inglés para marea viva es spring tide, que podría traducirse como "marea de primavera", de planeta, Δ F.*

ahí la aclaración del autor.

F I G U R A 9 . 1 7

Cuando las atracciones del Sol y la Luna

están alineadas mutuamente, ocurren

mareas vivas.

Todas las mareas vivas no son igualmente altas porque las distancias Tierra-Luna y Tierra-Sol varían; las trayectorias orbitales de la Tierra y la Luna son elípticas en lugar de circulares. La distancia entre la Luna y la Tierra varía aproximadamente 10% y su efecto para subir las mareas varía en alrededor de 30%. Las mareas vivas más altas ocurren cuando la Luna y el Sol están más cerca de la Tierra.

Cuando la Luna está a la mitad de camino entre una Luna nueva y una

Luna llena, en cualquier dirección (Figura 9.18), las mareas debidas al Sol y la Luna se cancelan parcialmente unas a otras. Entonces, las mareas altas son más bajas que el promedio y las mareas bajas no son tan bajas como las mareas bajas promedio. A éstas se les llama ***mareas muertas o de cuadratura****.*

F I G U R A 9 . 1 8

Otro factor que afecta las mareas es la inclinación del eje de la Tierra Cuando las atracciones del Sol y la Luna están separa-

(Figura 9.19). Aun cuando los abultamientos de marea opuestos sean iguadas unos 90° (en la época de la Luna media), ocurren

les, la inclinación de la Tierra hace que las dos mareas altas diarias expe-
mareas muertas.

rimentadas en la mayor parte de los océanos sean distintas la mayor parte del tiempo.

Las mareas no ocurren en los estanques porque

FIGURA 9.19

ninguna parte del estanque está significativamente

La desigualdad de las dos mareas altas

por día. Debido a la inclinación de la

más cerca de la Luna o del Sol que otra parte. Sin dife-

Tierra, una persona puede descubrir

rencias en tirones, no se producen mareas. Lo mismo

A la

que la marea más cercana a la Luna

ocurre con los líquidos de tu cuerpo: cualquier marea

Luna

es mucho más baja (o más alta) que la

en los líquidos de tu cuerpo que sea causada por la

marea medio día después. Las des-

Luna es despreciable. Uno no es lo suficientemente

igualdades de las mareas varían con las

alto como para tener mareas. Cualquier micromarea

posiciones de la Luna y el Sol.

que la Luna pueda producir en tu cuerpo sólo es de

cerca de un ducentésimo las mareas producidas por

un melón de 1 kg sostenido 1 m arriba de tu cabeza (Figura 9.20).

El tratamiento que aquí se da a las mareas está muy simplificado; las mareas en realidad son más complicadas. Las masas continentales que interfieren y la fricción con el fondo marino, por ejemplo, complican los movimientos de las mareas.

En muchos lugares, las mareas se descomponen en "cuencos de circulación" más pequeños, donde un abultamiento de marea viaja como una onda en circulación que se mueve en un pequeño cuenco de agua que está inclinado. Por esta razón, la marea alta puede estar a horas de distancia del momento en que la Luna está en lo alto del cielo. A mitad del océano, donde el rango entre mareas alta y baja por lo general es de alrededor de un metro, las variaciones en rango ocurren en diferentes partes del mundo. El rango es más grande en algunos fiordos de Alaska y es más notable en la cuenca de la Bahía de Fundy, entre New Brunswick y Nova Scotia en el este de Canadá, donde las diferencias en mareas en ocasiones superan los 15 m. Esto se debe principalmente al suelo marino, que forma un embudo hacia la costa en forma de V. Con frecuencia, la marea llega más rápido de lo que ***F I G U R A 9 . 2 0***

puede correr una persona. ¡Nunca busques almejas cerca del borde del agua en la La diferencia en fuerza de mareas marea baja en la Bahía de Fundy!

debida a un cuerpo de 1 kg colocado

1 m por arriba de la cabeza de una

persona de estatura promedio es de

aproximadamente 60 billonésimos

P U N T O D E C O N T R O L

(6 3 10211) N/kg. Para una Luna sobre

la cabeza, es de aproximadamente

Se sabe que tanto la Luna como el Sol producen mareas oceánicas. Y se sabe *0.3 billonésimos (3 3 10213) N/kg.*

que la Luna tiene el papel principal debido a su cercanía. ¿Esta cercanía de la *De modo que sostener un melón sobre*

Luna significa que jala sobre los océanos de la Tierra con más fuerza

gravita-tu cabeza produce aproximadamente

cional que el Sol?

200 veces más efecto de marea en tu

cuerpo que la Luna.

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

No, el tirón del Sol es mucho más fuerte. Pero la diferencia en los tirones lunares es más grande que la diferencia en los tirones solares. De modo que las mareas se deben principalmente a la Luna.

Mareas en la Tierra y la atmósfera

La Tierra no es un sólido rígido sino, en su mayor parte, es un líquido semifundido cubierto por una delgada corteza, sólida y plegable. Como resultado, las fuerzas de la marea Luna-Sol producen mareas de la Tierra así como mareas oceánicas. Dos veces al día, ¡la Además de las mareas oceánicas,

superficie sólida de la Tierra se eleva y cae hasta ¼ m! Como resultado, los terremotos y la Luna y el Sol producen mareas

las erupciones volcánicas tienen una probabilidad un poco más alta de ocurrir cuando la atmosféricas: más altas y después

Tierra experimenta una marea viva de Tierra; esto es: cerca de una Luna llena o nueva.

más bajas durante una Luna llena.

Vives en el fondo de un océano de aire que también experimenta mareas. Al estar

¿Esto explica por qué algunos de

en el fondo de la atmósfera, no percibes dichas mareas (tal como las criaturas en aguas tus amigos se alocan cuando la

Luna está llena?

profundas probablemente no perciben las mareas de los océanos). En la parte superior de la atmósfera está la ionosfera, llamada así porque contiene muchos iones: átomos con carga eléctrica que son resultado de la luz ultravioleta y el intenso bombardeo de rayos cósmicos. Los efectos de marea en la ionosfera producen corrientes eléctricas que alteran el campo magnético que rodea la Tierra. Éstas son mareas magnéticas. Ellas, a su vez, regulan el grado al que los rayos cósmicos penetran en la atmósfera inferior. La penetración de los rayos cósmicos es evidente en los cambios sutiles de comportamiento de los organismos vivos. Las altas y bajas de las mareas magnéticas son mayores cuando la atmósfera tiene sus mareas vivas, nuevamente, cerca de las lunas llena y nueva.

Luna

Abultamientos de marea en la Luna

exagerada

En la Luna existen dos abultamientos de marea por la misma razón que hay dos abulta-Brazo de

mientos de marea sobre la Tierra: los lados cercano y lejano de cada cuerpo son jalados CM

palanca

de manera diferente. De modo que la Luna es jalada y pierde un poco la forma esférica CG

Existe momento

para adoptar una forma de balón de fútbol, con su eje largo apuntando hacia la Tierra.

de torsión

Pero, a diferencia de las mareas de la Tierra, los abultamientos de marea permanecen cuando el

en posiciones fijas, sin subida ni bajada "diaria" de mareas de la Luna. Dado que la eje largo de

Luna tarda 27.3 días en dar una sola revolución en torno a su propio eje (y también CM

la Luna no está

en torno al eje Tierra-Luna), el mismo hemisferio lunar se presenta a la Tierra en todo alineado con

momento. Esto no es coincidencia; sucede porque el alargado centro de gravedad de Tierra

el CM de

la Luna se desplaza ligeramente de su centro de masa. De modo que, siempre que el la Tierra

eje largo de la Luna no esté alineado hacia la Tierra (Figura 9.21), la Tierra ejerce un pequeño momento de torsión sobre la Luna. Esto tiende a hacer girar la Luna para aliF I G U R A 9 . 2 1

nearse con el campo gravitacional de la Tierra, como el momento de torsión que alinea El tirón de la Tierra sobre la Luna en su

centro de gravedad produce un momento la aguja de una brújula con un campo magnético. Ahora ves que hay una razón por la de torsión en torno al centro de masa de

que la Luna siempre muestra su misma cara.

la Luna, que tiende a rotar el eje largo

Es bastante interesante que esta "cerradura de marea" también funcione para la de la Luna para alinearse con el campo

Tierra. Los días terrestres se hacen más largos, a razón de 2 milisegundos por siglo. En gravitacional de la Tierra (como la aguja

unos miles de millones de años, el día será tan largo como un mes, y la Tierra siempre de una brújula que se alinea con un

mostrará la misma cara a la Luna. ¡Qué tal eso!

campo magnético). Es por eso que sólo

un lado de la Luna mira a la Tierra.

***9.6** Campos gravitacionales*

La Tierra y la Luna jalan una sobre la otra. Esto es una acción a distancia porque Tierra y Luna interactúan sin estar en contacto. Es posible ver esto de un modo distinto: puedes considerar que la Luna está en contacto y en interacción con el campo gravitacional de la Tierra. Se puede considerar que las propiedades del espacio que rodea a cualquier cuerpo masivo se alteran de un modo tal que otro cuerpo masivo en esta

región experimenta una fuerza. Esta alteración del espacio es un ***campo gravitacional****.*

Suele pensarse que los cohetes y sondas del espacio distante están influidos por el campo gravitacional de sus ubicaciones en el espacio, y no por la Tierra u otros planetas o estrellas. El concepto de campo tiene un papel intermedio cuando se piensa en las ***SCREENCAST: Gravedad en***

fuerzas entre diferentes masas.

el interior de la Tierra

Un campo gravitacional es un ejemplo de campo de fuerza, pues cualquier cuerpo con masa experimenta una fuerza en el campo. Otro campo de fuerza, acaso más familiar, es el campo magnético. ¿Alguna vez has visto limaduras de hierro alineadas en patrones alrededor de un imán? (Observa por adelantado la Figura 24.2 de la página 455.) El patrón de las limaduras muestra la intensidad y la dirección del campo magnético en diferentes puntos en el espacio alrededor del imán. Donde las limaduras están más juntas, el campo es más intenso. La dirección de las limaduras muestra la dirección del campo en cada punto.

El patrón del campo gravitacional de la Tierra puede representarse con líneas de campo (Figura 9.22). Al igual que las limaduras de hierro alrededor de un imán, las líneas de campo están más juntas donde el campo gravitacional es más fuerte. En ***F I G U R A 9. 22***

cada punto sobre una línea de campo, la dirección del campo es a lo largo de la línea. Líneas de campo que representan el Las flechas muestran la dirección del campo. Una partícula, un astronauta, una nave campo gravitacional alrededor de la espacial o cualquier cuerpo en la vecindad de la Tierra se acelerará en la dirección de Tierra. Donde las líneas de campo están la línea de campo en dicha ubicación.

más juntas, el campo es más fuerte. Más

La intensidad del campo gravitacional de la Tierra, como la intensidad de su fuerza lejos, donde las líneas de campo están más sobre los objetos, sigue la ley del inverso al cuadrado. Es más intenso cerca de la super- separadas, el campo es más débil.

ficie de la Tierra y se debilita con la distancia creciente respecto de la Tierra.5

El campo gravitacional en la superficie de la Tierra varía un poco de una ubicación a otra. Arriba de grandes depósitos subterráneos de plomo, por ejemplo, el campo es ligeramente más intenso que el promedio. Arriba de grandes cavernas, el campo es un poco ***SCREENCAST: Túnel a través***

más débil. Para predecir qué se encuentra bajo la superficie de la Tierra, los geólogos y ***de la Tierra***

buscadores de petróleo y minerales toman mediciones precisas del campo gravitacional $a = g$

de la Tierra.

?

g

$a = 2$

Campo gravitacional en el interior de un planeta6

$a = 0$

El campo gravitacional de la Tierra existe tanto adentro como fuera de ella. Imagina g

que se taladra un agujero que atraviesa por completo la Tierra, desde el Polo Norte $a = 2$

hasta el Polo Sur. Olvídate de cosas imprácticas, como el interior fundido a alta temperatura, mejor piensa en el movimiento que experimentarías si cayeras en tal agujero.

$a = g$

Si comienzas en el extremo del Polo Norte, caerías y ganarías rapidez conforme caye- ***F I G U R A 9 . 2 3***

ras hacia el centro, luego perderías rapidez en el camino de "subida" al Polo Sur. Sin A medida que caes cada vez más y más arrastre aerodinámico, el viaje en un sentido tardaría casi 45 minutos. Si no pudieras rápido en un agujero perforado que atra-sujetarte en el borde del agujero cuando llegues al Polo Sur, caerías de vuelta hacia el viesa toda la Tierra, tu aceleración dis-centro y regresarías al Polo Norte en el mismo tiempo.

minuye porque la parte de la masa de la

Tierra abajo de ti se vuelve cada vez más

Tu aceleración, a, será progresivamente menor conforme continúes hacia el centro pequeña. Menos masa significa menos de la Tierra. ¿Por qué? Porque, a medida que caes hacia el centro de la Tierra, hay atracción hasta que, en el centro, donde menos masa que te jale hacia el centro y más masa sobre ti que te jale de vuelta hacia eres empujado igualmente en todas arriba. Cuando estás en el centro de la Tierra, el tirón hacia abajo se equilibra con el direcciones, tanto la fuerza neta como tirón hacia arriba, de modo que la fuerza neta sobre ti mientras zumbas con máxima la aceleración son cero. La cantidad de rapidez por el centro de la Tierra es

cero. Es correcto: ¡tienes máxima velocidad y mí- movimiento te lleva a pasar por el centro nima aceleración en el centro de la Tierra! ¡El campo gravitacional de la Tierra en su y, contra una aceleración creciente, hacia el extremo opuesto del túnel, donde la

centro es cero!7

aceleración nuevamente es g, dirigida de

vuelta hacia el centro.

5La intensidad del campo gravitacional g en cualquier punto es igual a la fuerza F por unidad de masa colocada ahí. De modo que g 5 F/ m y sus unidades son newtons por kilogramo (N/kg). El campo g también es igual a la aceleración de caída libre de la gravedad. Las unidades N/kg y m/s2 son equivalentes.

6Esta sección puede saltarse para un breve tratamiento de los campos gravitacionales.

Neil deGrasse Tyson describe muy

7Es muy interesante que, durante los primeros kilómetros bajo la superficie de la Tierra, en realidad ganarías bien un escenario de caída a través

aceleración porque la densidad del centro compacto es mucho mayor que la densidad del material de la superfi-de la Tierra en NOVA.

cie. De modo que la gravedad sería ligeramente más fuerte durante la primera parte de una caída. Más adentro, la gravitación se reduciría y disminuiría hasta cero en el centro de la Tierra.

La composición de la Tierra varía; es más densa en su núcleo y menos densa en la superficie. Sin embargo, dentro de un planeta hipotético con densidad uniforme, el campo interior aumenta linealmente (esto es: a una tasa estable) desde cero en su centro hasta g en la superficie. En este libro no se dirá por qué, pero tal vez tu instructor te dé la explicación. En cualquier caso, en la Figura 9.24 se muestra una gráfica de la intensidad del campo gravitacional dentro y fuera de un planeta sólido con densidad uniforme.

FIGURA 9.24

La intensidad del campo gravitacional

dentro de un planeta con densidad

uniforme es directamente proporcional

a la distancia radial desde su centro y es

máxima en su superficie. En el exterior,

es inversamente proporcional al cuadra-

do de la distancia desde su centro.

Campo gravitacional

R

2 R

3 R

Distancia

R

Imagina una caverna esférica en el centro de un planeta. La caverna no tendría gravedad debido a la cancelación de las fuerzas gravitacionales en toda dirección.

P

Sorprendentemente, el tamaño de la caverna no cambia este hecho, ¡incluso aunque B

constituyera la mayor parte del volumen del planeta! Un planeta hueco, como un A

enorme balón de básquetbol, no tendría campo gravitacional en ninguna parte de su interior. La cancelación completa de las fuerzas gravitacionales ocurre en todas partes en su interior. Para ver por qué, considera la partícula P de la Figura 9.25, que está al doble de distancia del lado izquierdo del planeta que del derecho. Si la grave-F I G U R A 9 . 2 5

dad dependiera sólo de la distancia, P para abarcar la región A en la figura y un cono El campo gravitacional en cualquier

parte del interior de un cascarón esférico con igual ángulo que llega a la derecha para abarcar la región B. La región A tiene 4

con grosor y composición uniformes es

veces el área y, por tanto, 4 veces la masa de la región B. Dado que 1/4 de 4 es igual cero, porque los componentes del campo a 1, P es atraído hacia la región A más lejana pero más masiva justo con tanta fuerza

provenientes de todas las partículas de

como si estuviera en la región B más cercana pero menos masiva. Hay cancelación.

masa del cascarón se cancelan entre sí.

Un razonamiento más profundo mostrará que la cancelación ocurre en cualquier Una masa en el punto P, por ejemplo,

parte dentro de un cascarón planetario que tenga densidad y grosor uniformes. Un es atraída con la misma intensidad a la

campo gravitacional existe dentro y fuera del cascarón. En su superficie exterior y región más grande pero más lejana A

que hacia la región B más pequeña pero

en el espacio lejano, el campo gravitacional es el mismo como si toda la masa del más cercana.

planeta estuviese concentrada en su centro. En todas partes dentro de la parte hueca, el campo gravitacional es cero. Cualquier persona en su interior tendría ingravidez.

¡A esto el autor le llama física "sabrosa"!

VIDEO: Campo gravitacional en

el interior de un planeta hueco

P U N T O D E C O N T R O L

1. Supón que caes en un agujero que se taladró justo en el centro de la Tierra y no intentas asirte de los bordes de ningún extremo. Si desprecias el VIDEO: Peso de un objeto en el

arrastre aerodinámico, ¿qué tipo de movimiento experimentarías?

interior de un planeta hueco mas no

2. A la mitad del camino hacia el centro de la Tierra, ¿la fuerza de gravedad en su centro

sobre ti sería menor que en la superficie de la Tierra?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Oscilarías de ida y vuelta. Si la Tierra fuera una esfera ideal de densidad uniforme y no hubiera arrastre aerodinámico, tu oscilación sería lo que se llama movimiento armónico simple. Cada viaje redondo tardaría casi 90 minutos. En el Capítulo 10 verás que un satélite terrestre en órbita cercana alrededor de la Tierra también tarda 90 minutos en dar una vuelta completa. (Esto no es coincidencia: si estudias más física, aprenderás que el movimiento armónico simple "de ida y vuelta" sólo es el componente vertical del movimiento circular uniforme...*

un asunto interesante.)

2. *La fuerza gravitacional sobre ti sería menor, porque hay menos masa de Tierra abajo de ti, que jala sobre ti con menos fuerza. Si la Tierra fuera una esfera uniforme con densidad uniforme, la fuerza gravitacional a la mitad de camino hacia el centro sería exactamente la mitad que en la superficie. Pero dado que el núcleo de la Tierra es tan denso (unas siete veces la densidad de la roca superficial), la fuerza gravitacional a la mitad sería un poco más que la mitad. La cifra exacta depende de cómo varíe la densidad de la Tierra con la profundidad, que es información que no se conoce en la actualidad.*

Aunque la gravedad puede cancelarse dentro de un cuerpo o entre cuerpos, no puede blindarse en la misma forma que puede hacerse con las fuerzas

eléctricas. En el Capítulo 22 verás que las fuerzas eléctricas pueden repelerse así como atraerse, lo que hace posible el blindaje. Pero, dado que la gravitación sólo atrae, no puede haber un tipo similar de blindaje. Los eclipses ofrecen evidencias convincentes de esto. La Luna está en el campo gravitacional tanto del Sol como de la Tierra. Durante un eclipse lunar, la Tierra está directamente entre la Luna y el Sol, y cualquier blindaje del campo del Sol por parte de la Tierra resultaría en una desviación de la órbita de la Luna.

Incluso un muy ligero efecto de blindaje se acumularía en el transcurso de algunos años y se mostraría en el cálculo del momento de los eclipses posteriores. Pero no ha habido tales discrepancias; los eclipses pasados y futuros se calculan con un alto grado de exactitud tan sólo con el uso de la simple ley de gravitación. Jamás se ha encon -

tra do un efecto de blindaje en la gravedad.

Teoría de gravitación de Einstein

En la primera parte del siglo XX, Einstein presentó, en su teoría de relatividad general, un modelo de gravedad muy distinto al de Newton. Einstein percibió un campo gravitacional como una distorsión geométrica del espacio-tiempo 4-dimensional; se dio cuenta de que los cuerpos hacen abolladuras en el espacio y tiempo en forma parecida a como una bola masiva colocada en medio de una cama de agua abolla la superficie bidimensional (Figura 9.26). Cuanto más masiva sea la bola, más grande será la abolladura o distorsión. Si una canica rueda sobre la parte superior de la cama, pero muy alejada de la bola, la canica rodará en una trayectoria en línea recta. Pero si la canica rueda cerca de la bola, se curvará a medida que ruede por la superficie abollada de la cama de agua.
F I G U R A 9 . 2 6

Si la curva se cierra sobre sí misma, la canica orbitará la bola o en una trayectoria oval o Espacio-tiempo distorsionado. El en una circular. Si te pones tus gafas newtonianas, de modo que veas la bola y la canica espacio-tiempo cerca de una estrella se mas no la cama, puedes concluir que la canica se curva porque es atraída hacia la bola. curva en cuatro dimensiones en forma Si te pones tus gafas einsteinianas, de modo que veas la canica y la cama de agua abolla- similar a la superficie bidimensional da mas no la bola "distante", probablemente concluirías que la canica se curva porque de una cama de agua cuando una bola pesada descansa sobre ella.

la superficie sobre la cual se mueve es curva, en dos dimensiones para la cama de agua y en cuatro dimensiones para espacio y tiempo.8 En el

Capítulo 36 se abordará la teo -

ría de la gravitación de Einstein con más detalle.

8No te desalientes si no puedes visualizar el espacio-tiempo 4-dimensional. El mismo Einstein con frecuencia decía a sus amigos: "No lloren. Yo tampoco puedo hacerlo". ¡Acaso no seas tan diferente de los grandes pensadores en torno a Galileo que no podían concebir una Tierra en movimiento!

***9.7** Agujeros negros*

Supón que eres indestructible y puedes viajar en una nave espacial a la superficie de una estrella. Tu peso en la estrella dependería de tu masa, de la masa de la estrella y de la distancia entre el centro de la estrella y tu centro de masa. Si la estrella se apagara y colapsara a la mitad de su radio sin cambio en su masa, tu peso en su superficie, determinado por la ley del inverso al cuadrado, sería cuatro veces mayor (Figura 9.27). Si la estrella colapsara a un décimo de su radio, tu peso en su superficie sería 100 veces mayor. Si la estrella siguiera encogiéndose, el campo gravitacional en la superficie se volvería más intenso.

Cada vez sería más difícil que partiera una nave espacial. La velocidad necesaria para escapar, la velocidad de escape, aumentaría. Si una estrella como el Sol colapsara a un radio de menos de 3 km, la velocidad de escape de su superficie superaría la rapidez de la luz,

¡y nada, ni siquiera la luz, podría escapar! El Sol sería invisible. Sería un ***agujero negro****.*

10,000 N

Persona indestructible

de pie sobre una estrella

F I G U R A 9 . 2 7

que se encoge

Si una estrella colapsa a la mitad de su

40,000 N

radio y no hay cambio en su masa, la

R

1

gravedad en su superficie se multiplica

2 R

por 4.

El Sol, de hecho, tiene muy poca masa para experimentar tal colapso, pero cuando algunas estrellas con masas mayores, ahora estimadas en al menos 1.5 masas solares o más, llegan al final de sus recursos nucleares, experimentan colapso y, a menos que la rotación sea suficientemente rápida, el colapso continúa hasta que las estrellas llegan a densidades infinitas. La gravedad cerca de estas estrellas encogidas es tan enorme que la luz no puede escapar de su vecindad. Se comprimen hasta quedar fuera de la existencia visible. Los resultados son los agujeros negros, que son completamente invisibles.

Un agujero negro no es más masivo que la estrella de la cual colapsó, de modo que el campo gravitacional en regiones que están en el radio de la estrella original, y más grandes que él, no es diferente después de que la estrella colapsa que antes. Pero, a distancias más cercanas a la vecindad de un agujero negro, el campo gravitacional puede ser enorme, una distorsión circundante en la que todo lo que pasa muy cerca (luz, polvo o una nave espacial) son succionados. Los astronautas podrían entrar en los límites de ***F I G U R A 9 . 2 8***

Todo lo que cae en un agujero negro deja esta distorsión y, si estuvieran en una poderosa nave espacial, todavía podrían escapar.

de existir. El agujero negro sólo conserva

Sin embargo, una vez dentro de cierta distancia, no podrían escapar y desaparecerían la masa, la cantidad de movimiento

del Universo observable. Cualquier objeto que cayera en un agujero negro sería despe-angular y la carga eléctrica.

dazado. Ninguna característica del objeto sobreviviría, excepto su masa, su cantidad de movimiento angular (si tuviera alguna) y su carga eléctrica (si

tuviera alguna).

Una entidad teórica que tiene ciertas similitudes con el agujero negro es el "agujero de gusano" (Figura 9.29). Al igual que un agujero negro, un agujero de gusano es una enorme distorsión del espacio y el tiempo. Pero, en lugar de colapsar hacia un punto infinitamente denso, el agujero de gusano se abre en alguna otra parte del Universo,

¡o incluso, plausiblemente, en algún otro Universo! Mientras que la existencia de los agujeros negros se ha confirmado, el agujero de gusano sigue siendo una noción excesivamente especulativa. Algunos aficionados a la ciencia imaginan que el agujero de gusano abre la posibilidad de los viajes en el tiempo.9

F I G U R A 9 . 2 9

¿Cómo puede detectarse un agujero negro si literalmente no hay forma de "verlo"?

Un agujero de gusano especulativo

Se hace sentir mediante su influencia gravitacional sobre la materia cercana y sobre las puede ser la entrada hacia otra parte del

9

Universo o incluso a otro Universo.

Stephen Hawking, un experto pionero en los agujeros negros, fue uno de los primeros en especular sobre la existencia de los agujeros de gusano. Pero, en 2003, para consternación de muchos aficionados a la ciencia, anunció su convicción de que no pueden existir.

estrellas vecinas. Hay buena evidencia de que algunos sistemas de estrel as binarias consisten en una estrel a luminosa y una compañera invisible con propiedades parecidas a las de un agujero negro orbitando uno alrededor de la otra. Incluso la evidencia más fuerte Contrario a las historias acerca de

apunta a agujeros negros más masivos en los centros de muchas galaxias (acaso de todas los agujeros negros, no son agresi-las galaxias). En una galaxia joven, observada como "quásar", el agujero negro central vos ni

alcanzan y tragan inocentes

succiona materia que emite grandes cantidades de radiación mientras se zambul e en el ol-a distancia. Sus campos gravitacio-

vido. En algunas galaxias más viejas se observan estrel as que hacen círculos en poderosos nales no son más intensos que los

campos gravitacionales alrededor de centros aparentemente vacíos. Estos agujeros negros campos originales en torno a las

galácticos tienen masas que varían de mil ones a más de mil mil ones de veces la masa del estrellas antes de colapsar, excepto

a distancias menores que el radio

Sol. El centro de la Vía Láctea, aunque no tan fácil de ver como los centros de algunas original de la estrella. A menos

otras galaxias, casi seguramente alberga un agujero negro con una masa de 4 mil ones de que estén muy cerca, los agujeros

masas solares. Los descubrimientos están surgiendo más rápido de lo que los libros de texto negros no deberían preocupar a

pueden informar. Revisa en tu sitio web de astronomía las actualizaciones más recientes.

los futuros astronautas.

***9.8** Gravitación universal*

Todo mundo sabe que la Tierra es redonda. Pero, ¿por qué la Tierra es redonda? Es redonda debido a la gravedad. Todo atrae a todo lo demás, ¡y así la Tierra se atrae a el a misma tanto como puede! Cualquier "esquina" de la Tierra se ha jalado hacia adentro; como resultado, toda parte de la superficie es equidistante del centro de gravedad. Esto la hace una esfera.

Por tanto, de acuerdo con la ley de gravitación, se ve que el Sol, la Luna y la Tierra son esféricos porque tienen que serlo (aunque los efectos rotacionales los hacen un poco elipsoidales).

Si todo jala sobre todo lo demás, entonces los planetas deben jalar unos sobre otros.

La fuerza que controla a Júpiter, por ejemplo, no es sólo la fuerza del Sol; también hay Una esfera tiene el área superficial

tirones de los otros planetas. Sus efectos son pequeños en comparación con el tirón del más pequeña de cualquier volumen de materia.

Sol mucho más masivo, pero aun así se ven. Por ejemplo, Saturno jala sobre Júpiter, lo que perturba la de otro modo suave trayectoria de Júpiter, y Júpiter hace lo mismo con Saturno. Ambos planetas "se bambolean" en sus órbitas. Las fuerzas interplanetarias que causan este bamboleo se llaman perturbaciones.

Hacia la década de 1840, los estudios del planeta recién descubierto en esa época, Urano, mostraban que las desviaciones de su órbita no podían explicarse con las perturbaciones de todos los demás planetas conocidos. O la ley de gravitación fal aba a esta gran distancia del Sol o un octavo planeta desconocido perturbaba la órbita de Urano.

Un inglés, J. C. Adams, y un francés, Urbain Leverrier, supusieron cada uno que la ley de Newton era válida y de manera independiente calcularon dónde debería estar un octavo planeta. Casi al mismo tiempo, Adams envió una carta al Observatorio de Greenwich en Inglaterra y Leverrier envió una carta al Observatorio de Berlín en Alemania, y ambos sugerían buscar el nuevo planeta en cierta área del cielo. La solicitud de Adams fue retrasada por malas interpretaciones en Greenwich, pero la solicitud de Leverrier fue atendida de inmediato. ¡Esa misma noche se descubrió el planeta Neptuno!

Un rastreo posterior de las órbitas de Urano y Neptuno condujo a la predicción y descubrimiento de Plutón en 1930 en el Observatorio Lowell en Arizona. Independientemente de cualquier cosa que hayas aprendido antes, los astrónomos ahora consideran ***F I G U R A 9 . 3 0***

a Plutón como un planeta enano, una nueva categoría que incluye ciertos asteroides en Formación del sistema solar. Una bola de gas interestelar ligeramente en rotación (a) se contrae debido a gravitación

mutua y entonces (b) conserva cantidad

de movimiento angular al acelerar. El

aumento de la cantidad de movimiento

de partículas individuales y conglomera-

dos de partículas hace que (c) se disper-

sen en trayectorias más anchas en torno

al eje rotacional, lo que produce una

forma global de disco. La mayor área

superficial del disco favorece el enfria-

miento y la condensación de materia en

(c)

(b)

remolinos giratorios: el nacimiento de

(a)

los planetas.

el cinturón Kuiper. Sin importar su categoría, Plutón tarda 248 años en hacer una sola revolución alrededor del Sol, de modo que nadie lo volverá a ver en la posición en que fue descubierto sino hasta el año 2178.

Hay datos recientes que sugieren que el Universo no sólo se expande sino que acelera hacia afuera, empujado por una energía oscura antigravedad que constituye 73% del Universo. Además, la velocidad a la que las estrel as dan vueltas dentro de las galaxias sugiere que no sólo jalan sobre el as las masas de las estrel as visibles; también hay un jalón de algún nuevo tipo de materia invisible, llamada materia oscura, que constituye 23% del Universo. La materia ordinaria, el material de las estrel as, los repol os y los reyes, constituye sólo alrededor de 4%. Los conceptos de energía oscura

y materia oscura son descubrimientos de finales del siglo xx y principios del xxi. La manera de ver el Universo en la actualidad ha avanzado mucho y ha dejado atrás el Universo que Newton observaba.

Una idea muy difundida es que,

Sin embargo, pocas teorías han influido tanto en la ciencia y la civilización como la cuando la Tierra dejó de conside-teoría de Newton de la gravedad. Las ideas de Newton verdaderamente cambiaron al rarse el centro del Universo, su lugar y la humanidad descendieron

mundo y elevaron la condición humana. Los éxitos de las ideas de Newton inauguraron de categoría y ya no se conside-la Era de la Razón. Newton demostró que, mediante observación y razonamiento, las raron especiales. Por el contrario,

personas podían revelar el funcionamiento del universo físico. Cuán profundo es que escritos de la época sugieren

todas las lunas, los planetas, las estrel as y las galaxias tengan una regla tan hermosamente que la mayoría de los europeos

simple que las gobierne, a saber,

opinaba que los seres humanos

eran sucios y pecadores por la baja

m m

$$F = G \frac{1 \; 2}{}$$

posición de la Tierra: más lejos

$$d \; 2$$

de los cielos, con el infierno en

su centro. La elevación humana

La formulación de esta sencilla regla es una de las principales razones del éxito que no ocurrió sino hasta que el Sol,

siguió en la ciencia, pues brindó la esperanza de que otros fenómenos del mundo tam-visto positivamente, asumió una

bién pudieran describirse con leyes igual de sencillas y universales.

posición central. La humanidad se

Esta esperanza nutrió el pensamiento de muchos científicos, artistas, escritores y fi-volvió especial cuando mostró que

lósofos del siglo xviii. Uno de el os fue el filósofo inglés John Locke, quien afirmó que no era tan especial.

la observación y la razón, como lo demostró Newton, deben ser el mejor juez y guía en todas las cosas. Locke exhortó a buscar y descubrir en toda la naturaleza, e incluso en la sociedad, cualesquiera "leyes naturales" que pudieran existir. Al usar la física newtoniana como modelo de razonamiento, Locke y sus seguidores crearon un sistema de gobierno que encontró seguidores en las 13 colonias británicas al otro lado del Atlántico. Dichas ***VIDEO: Descubrimiento***

ideas culminaron en la Declaración de Independencia y en la Constitución de los Estados ***de Neptuno***

Unidos de América.

R E S U M E N D E T É R M I N O S *(C O N O C I M I E N T O)* ***Ley de gravitación universal.*** *Todo cuerpo en el Universo*

Mareas vivas o de sicigia. *Mareas alta o baja que ocurren*

atrae a todos los demás cuerpos con una fuerza que, para

cuando el Sol, la Tierra y la Luna están alineados de modo

dos cuerpos, es directamente proporcional al producto de

que las mareas debidas al Sol y a la Luna coinciden, lo que

sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la

hace que las mareas altas sean más altas que el promedio y

distancia entre sus centros:

las mareas bajas sean más bajas que el promedio.

m m

$F = G \frac{1 \; 2}{}$

Mareas muertas o de cuadratura. *Mareas que ocurren cuando*

d 2

la Luna está a medio camino entre nueva y llena, en cualquier

Ley del inverso al cuadrado. *Ley que relaciona la intensidad dirección. Las mareas debidas al Sol y a la Luna se cancelan*

de un efecto con el inverso del cuadrado de la distancia

parcialmente, lo que hace a las mareas altas más bajas que el

desde la causa. La gravedad sigue una ley del inverso al

promedio y a las mareas bajas más altas que el promedio.

cuadrado, como lo hacen los efectos de los fenómenos

Campo gravitacional. *La influencia que un cuerpo masivo*

eléctricos, magnéticos, luminosos, sonoros y de radiación.

extiende dentro del espacio que lo rodea, lo que produce una

Peso. *Fuerza que un objeto ejerce sobre una superficie de sostén fuerza sobre otro cuerpo masivo. Se mide en newtons por*

(o, si está suspendido, sobre una cuerda de soporte), que con

kilogramo (N/kg).

frecuencia, pero no siempre, se debe a la fuerza de gravedad.

Agujero negro. *Concentración de masa que resulta del colapso*
Ingravidez. *No tener una fuerza de sostén, como en la caída*

gravitacional, cerca del cual la gravedad es tan intensa que ni

libre.

siquiera la luz puede escapar.

C A PÍ T U LO 9 R E V ISI Ó N

177

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S *(C O M P R E N S I Ó N)*

9.1 La ley de gravitación universal

9.5 Mareas oceánicas

1. ¿Qué descubrió Newton acerca de la gravedad?

16. ¿Las mareas dependen más de la intensidad del tirón

2. ¿Cuál es la síntesis newtoniana?

gravitacional o de la diferencia de intensidades? Explica.

3. ¿En qué sentido la Luna "cae"?

17. ¿Por qué tanto el Sol como la Luna ejercen una mayor fuerza

4. Enuncia con palabras la ley de gravitación universal de

gravitacional sobre un lado de la Tierra que sobre el otro?

Newton. Luego haz lo mismo con una ecuación.

18. ¿Cuál tiene las mareas más altas: las mareas vivas o las

mareas muertas?

9.2 La constante de gravitación universal, G

19. ¿Las mareas ocurren en el interior fundido de la Tierra por

5. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza gravitacional entre dos

la misma razón que las mareas ocurren en los océanos?

cuerpos de 1 kg que están separados 1 m?

20. ¿Por qué todas las mareas son más grandes en la época de

6. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza gravitacional de la Tierra

una Luna llena o una Luna nueva?

sobre un cuerpo de 1 kg en la superficie de la Tierra?

21. ¿Sobre la Luna ocurriría un momento de torsión si el

7. Cuando Henry Cavendish midió por primera vez G, los

satélite fuese esférico, con su centro de masa y su centro

periódicos de la época elogiaron su experimento como "el

de gravedad en la misma ubicación?

experimento que pesó la Tierra". ¿Por qué?

9.6 Campos gravitacionales

9.3 Gravedad y distancia: la ley del inverso al

22. ¿Qué es un campo gravitacional y cómo puede medirse

cuadrado

su intensidad?

8. ¿Cómo cambia la fuerza de gravedad entre dos cuerpos

23. ¿Cuál es la magnitud del campo gravitacional en el

cuando la distancia entre ellos se duplica?

centro de la Tierra?

9. ¿Cómo cambia el grosor de la pintura rociada sobre una

24. En el caso de un planeta con densidad uniforme, ¿cuál sería

superficie cuando el rociador se aleja al doble de la distancia?

la diferencia entre la magnitud del campo gravitacional a

10. ¿Dónde pesas más: en el fondo del Valle de la Muerte o en

mitad del camino hacia el centro y el campo en la superficie?

lo alto de uno de los picos de la Sierra Nevada? ¿Por qué?

25. ¿Cuál sería la magnitud del campo gravitacional en

9.4 Peso e ingravidez

cualquier parte del interior de un planeta esférico hueco?

11. ¿Los resortes que están en el interior de una báscula se

26. Newton consideraba que la curvatura de la trayectoria de

comprimirían más o menos si te pesaras en un elevador

un planeta era causada por una fuerza que actuaba sobre

que acelera hacia arriba? ¿Hacia abajo?

el planeta. ¿Qué pensaba Einstein sobre la trayectoria

curva de un planeta?

12. ¿Los resortes que están en el interior de una báscula se

comprimirían más o menos si te pesaras en un elevador

9.7 Agujeros negros

que se mueve hacia arriba con velocidad constante? ¿Hacia

27. Si la Tierra se encogiera pero no hubiera cambio en su

abajo con velocidad constante?

masa, ¿qué ocurriría con tu peso en la superficie?

13. ¿Cuándo tu peso es igual a mg?

28. ¿Qué ocurre con la intensidad del campo gravitacional en

14. Proporciona un ejemplo de cuándo tu peso es mayor que

la superficie de una estrella que se encoge?

mg. Proporciona un ejemplo de cuándo tu peso es cero.

29. ¿Por qué un agujero negro es invisible?

15. ¿Por qué los ocupantes de la Estación Espacial

9.8 Gravitación universal

Internacional están ingrávidos cuando están firmemente

asidos en la gravedad de la Tierra?

30. ¿Cuál fue la causa de las perturbaciones descubiertas en

la órbita del planeta Urano? ¿A qué descubrimiento más

grande condujo esto?

***P I E N S A Y R E A L I Z A** (A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 31. Estira las manos enfrente de ti, una*

tan fuerte que probablemente deseches esta información.

al doble de distancia de tus ojos

Ahora, si encimas un poco las manos y las ves con un ojo

que la otra y calcula cuál mano

cerrado, verás que la mano más cercana es claramente más

parece más grande. La mayoría

grande. Esto plantea una pregunta interesante (que Frank

de las personas las ven más o

Oppenheimer hizo al autor hace algunos años cuando por

menos del mismo tamaño, aunque

primera vez impartió clase en el Exploratorium): "¿qué otras

muchos ven la mano más cercana

ilusiones tienes que no se comprueban tan fácilmente?"

un poco más grande. Casi nadie,

32. Repite el experimento de ojear, sólo que esta vez usa dos

con una mirada a la ligera, ve la

billetes: uno sin doblar y el otro doblado a la mitad por lo

mano más cercana cuatro veces más grande pero, por la ley

largo y luego de nuevo por lo ancho, de modo que tenga

del inverso al cuadrado, la mano más cercana debe parecer el

1/4 de su área. Ahora sostén los dos frente a tus ojos.

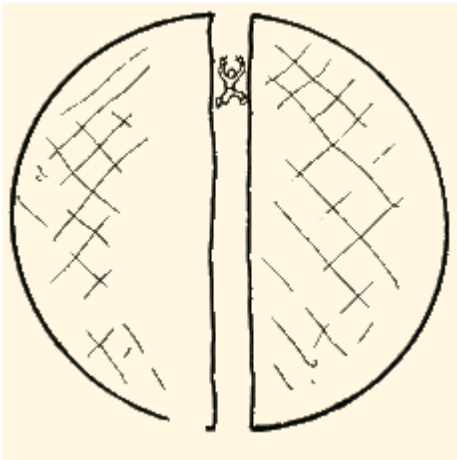
doble de alta y el doble de ancha y, por tanto, parece ocupar

¿Dónde sostienes el billete doblado de modo que parezca

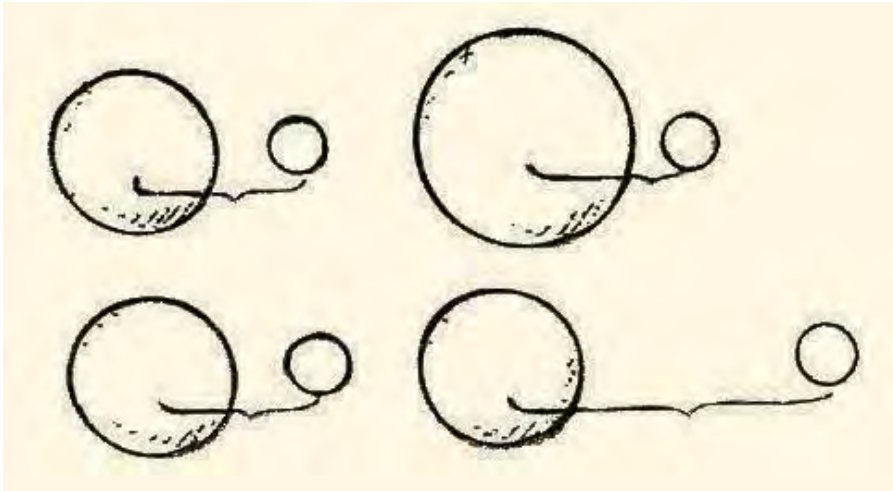
cuatro veces más de tu campo visual que la mano más lejana.

del mismo tamaño que el no doblado? ¿Simpático?

Tu convicción de que tus manos son del mismo tamaño es



-
-
-
-



S U S T I T U Y E Y L I S T O *(F A M I L I A R I Z A C I Ó N C O N E C U A C I O N E S)*

m m

1

2

F = G

36. Calcula la fuerza de gravedad que la Tierra y el Sol

2

d

ejercen mutuamente (la masa del Sol es 2.0 3 1030 kg; la

33. Calcula la fuerza de gravedad de la Tierra sobre una masa

distancia promedio Tierra-Sol es 1.5 3 1011 m).

de 1 kg en la superficie de la Tierra. La masa de la Tierra

37. Calcula la fuerza de gravedad que un bebé recién nacido

es 6.0 3 1024 kg y su radio es 6.4 3 106 m. ¿El resultado te

(masa 5 3.0 kg) y el planeta Marte (masa 5 6.4 3 1023 kg)

sorprende?

ejercen mutuamente cuando Marte está en su punto más

34. Calcula la fuerza de gravedad sobre la misma masa de 1 kg si

cercano a la Tierra (distancia 5 5.6 3 1010 m).

estuviera a 6.4 3 106 sobre la superficie de la Tierra (esto es:

38. Calcula la fuerza de gravedad que un bebé recién nacido

si estuviera a dos radios terrestres del centro de la Tierra).

de 3.0 kg de masa y el obstetra de 100.0 kg de masa

35. Calcula la fuerza de gravedad que la Tierra

ejercen uno sobre el otro, cuando la distancia entre ellos

(masa 5 6.0 3 1024 kg) y la Luna (masa 5 7.4 3 1022 kg)

es 0.5 m. ¿Cuál ejerce más fuerza gravitacional sobre el

ejercen una sobre la otra. La distancia promedio Tierra-

bebé: Marte o el obstetra? ¿Por cuánto?

Luna es 3.8 3 108 m.

P I E N S A Y R E S U E L V E *(A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 39. Supón que estás de pie en lo alto de una escalera tan alta*

200 km arriba de la superficie de la Tierra. La masa de

que te encuentras tres veces más lejos del centro de la

la Tierra es 6.0 3 1024 kg, y su radio es 6.38 3 106 m

Tierra de lo que estás en la actualidad. Demuestra que tu

(6,380 km). ¿Qué porcentaje de 9.8 m/s2 es tu respuesta?

peso sería 1/9 de su valor actual.

44. La ley de gravitación universal de Newton dice que

40. Demuestra que la fuerza gravitacional entre dos planetas

se cuadruplica si las masas de ambos planetas se duplican

m m

$F = G \frac{1}{2}$.

pero la distancia entre ellos permanece igual.

d 2

41. Demuestra que no hay cambio en la fuerza de gravedad

F

a

neta

entre dos objetos cuando sus masas se duplican y la

La segunda ley de Newton dice que $= m$

distancia entre ellos se duplica.

42. Encuentra el cambio en la fuerza de gravedad entre dos

a. Con un poco de razonamiento algebraico demuestra

planetas cuando la distancia entre el os se vuelve 10 veces

que tu aceleración gravitacional hacia cualquier planeta

menor.

GM

de masa M a una distancia d de su centro es a $=$

.

43. Muchas personas creen erróneamente que los astronautas

d 2

que orbitan la Tierra están "por arriba de la gravedad".

b. ¿De qué manera esta ecuación te dice si tu aceleración

Calcula g para el territorio del transbordador espacial,

gravitacional depende o no de tu masa?

P I E N S A Y C L A S I F I C A *(A N Á L I S I S)*

45. El planeta y su luna se atraen gravitacionalmente entre sí.

a. Tres velas vistas a una distancia de 3 m.

Clasifica las fuerzas de atracción entre cada par, de mayor

b. Dos velas vistas a una distancia de 2 m.

a menor.

c. Una vela vista a una distancia de 1 m.

47. Supón que caes en un agujero taladrado que atraviesa

A

B

toda la Tierra. Desprecia la fricción y los efectos de

2M

rotación y clasifica de mayor a menor las posiciones A, B,

M

m

m

C y D para tu:

d

a. rapidez.

d

b. aceleración hacia el centro de la Tierra.

C

D

M

2m

2m

M

A

d

2d

46. Piensa en la luz de muchas llamas de velas, cada una

B

con la misma brillantez. Clasifica la luz que entra en tu

ojo, de más brillante a menos brillante, en las siguientes

C

situaciones:

D

C A PÍ T U LO 9 R E V ISI Ó N

179

48. Clasifica las fuerzas gravitacionales promedio, de mayor a

49. Clasifica las fuerzas de micromarea sobre tu propio

menor, entre:

cuerpo, de mayor a menor, producidas por:

a. el Sol y Marte.

a. la Luna.

b. el Sol y la Luna.

b. la Tierra.

c. el Sol y la Tierra.

c. el Sol.

***PIENSA Y EXPLICA** (SÍNTESIS)*

50. Comenta si la siguiente etiqueta en un producto de consumo debe o no ser causa de preocupación:

PRECAUCIÓN: la masa de este producto jala sobre toda otra masa en el Universo, con una fuerza de atracción que es proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre sus centros.

51. La fuerza gravitacional actúa sobre todos los cuerpos en proporción a sus masas. ¿Por qué, entonces, un cuerpo pesado no cae más rápido que un cuerpo ligero?

52. ¿Cuál sería la trayectoria de la Luna si de algún modo todas las fuerzas gravitacionales sobre el a se volvieran cero?

65. Si estuvieras en un automóvil que sale del camino desde lo alto de un risco, ¿por qué momentáneamente estarías ingrávido? ¿La gravedad todavía actuaría sobre ti?

66. ¿Cuáles dos fuerzas actúan sobre ti cuando estás en un elevador en movimiento? ¿Cuándo estas dos fuerzas son de igual magnitud y cuándo no lo son?

67. Si estuvieras en un elevador en caída libre y soltaras un lápiz, éste flotaría enfrente de ti. ¿Existe una fuerza de gravedad que actúe sobre el lápiz? Defiende tu respuesta.

68. ¿Por qué un saltador de bungee siente ingravidez durante el salto?

53. ¿La fuerza de gravedad es más intensa sobre un trozo de

69. Tu amigo dice que la principal razón por la que los

hierro que sobre un trozo de madera con la misma masa?

astronautas en órbita sienten ingravidez es porque están

Defiende tu respuesta.

más allá del tirón principal de la gravedad de la Tierra.

54. ¿La fuerza de gravedad es más intensa sobre un trozo de

¿Por qué estás de acuerdo o en desacuerdo?

papel arrugado que sobre un trozo idéntico de papel que

70. Un astronauta en la Estación Espacial Internacional no

no está arrugado? Defiende tu respuesta.

puede ponerse de pie sobre una báscula para pesarse. Pero

55. ¿Cuál es la relación entre fuerza y distancia en una ley del

un astronauta que está dentro de una estación espacial

inverso al cuadrado?

giratoria (que todavía no se construye) puede pararse sobre

56. Una manzana cae debido a la atracción gravitacional

una báscula. Explica.

hacia la Tierra. ¿Cómo se compara la atracción

71. La fuerza debida a la gravedad sobre ti es mg. ¿Bajo qué

gravitacional de la Tierra con la de la manzana? (¿La

condiciones tu peso también es mg?

fuerza cambia cuando intercambias m y m en la

2

72. Párate sobre una báscula sobre suelo a nivel y la lectura

ecuación para gravedad: m m en lugar de m m ?)

2 1

1 2

sobre la báscula muestra la fuerza gravitacional sobre ti,

57. Larry pesa 300 N en la superficie de la Tierra. ¿Cuál es el

mg. Si el suelo se inclina en un ángulo, la lectura de la

peso de la Tierra en el campo gravitacional de Larry?

báscula será menor que mg. Discute por qué esto es así y

58. ¿La aceleración debida a la gravedad en la cima del monte

por qué es buena idea medir tu peso cuando la báscula

Everest es mayor o menor que a nivel del mar? Defiende tu

está sobre una superficie horizontal.

respuesta.

73. Supón que saltas arriba y abajo mientras te pesas sobre

59. Un astronauta aterriza en un planeta que tiene la misma

una báscula. La lectura del peso igualmente "salta arriba

masa que la Tierra pero el doble de diámetro. ¿Cómo

y abajo". ¿Esto significa que la fuerza de gravedad, mg,

difiere el peso del astronauta con el que tiene en la Tierra?

varía cuando saltas?

60. Un astronauta aterriza en un planeta que tiene el doble de

74. Si alguien jalara fuerte la manga de tu camisa, probable-

masa que la Tierra y el doble de diámetro. ¿Cómo difiere

mente la rasgaría. Pero si todas las partes de tu camisa fue-

el peso del astronauta con el que tiene en la Tierra?

ran jaladas por igual, no se rasgaría. ¿Cómo se relaciona esto

61. Si de algún modo la Tierra se expandiera a un radio más

con las fuerzas de las mareas?

grande, sin cambiar su masa, ¿cómo se afectaría tu peso?

75. La mayoría de las personas de hoy saben que las

¿Cómo se afectaría si la Tierra se encogiera? (Sugerencia:

mareas oceánicas son provocadas principalmente por la

deja que la ecuación de fuerza gravitacional guíe tu

influencia gravitacional de la Luna, y en consecuencia la

razonamiento.)

mayoría de las personas cree que el tirón gravitacional de

62. ¿Por qué una persona en caída libre experimenta

la Luna sobre la Tierra es mayor que el tirón gravitacional

ingravidez, en tanto que una persona que cae con

del Sol sobre la Tierra. ¿Tú qué crees?

velocidad terminal no la experimenta?

76. ¿Existe un momento de torsión en torno al centro de masa

63. ¿Por qué los pasajeros de los aviones a gran altitud tienen la

de la Luna cuando el eje largo de la Luna se alinea con el

sensación de peso en tanto que los pasajeros de un vehículo

campo gravitacional de la Tierra? Explica cómo se compara

espacial en órbita, como el transbordador espacial, no la

esto con una brújula magnética.

tienen?

77. ¿Las mareas oceánicas existirían si el tirón gravitacional

64. ¿La fuerza gravitacional actúa sobre una persona que cae

de la Luna (y del Sol) de algún modo fueran iguales en

desde un risco? ¿Sobre un astronauta en el interior de un

todas las partes del mundo? Explica.

transbordador espacial en órbita?

78. ¿Por qué las mareas oceánicas altas no están separadas

marea considerablemente menor en el compartimiento

exactamente 12 horas?

de líquidos de tu cuerpo que un melón de 1 kg sostenido

79. Con respecto a las mareas oceánicas vivas y muertas,

sobre tu cabeza?

¿cuándo son más bajas las mareas? Esto es: ¿cuál marea es

83. El valor de g en la superficie de la Tierra es aproximada-mejor para buscar almejas?

mente 10 m/s2. ¿Cuál es el valor de g a una distancia al

80. Siempre que la marea oceánica es inusualmente alta, ¿la

doble del radio de la Tierra?

siguiente marea baja será inusualmente baja? Defiende

84. Si la Tierra tuviera densidad uniforme (misma masa/

tu respuesta en términos de "conservación de agua".

volumen en todas partes), ¿cuál sería el valor de g dentro

(Si derramas agua en una tina de modo que tenga más

de la Tierra a la mitad de su radio?

profundidad en un extremo, ¿el otro extremo tendrá

85. Si la Tierra tuviera densidad uniforme, ¿tu peso

superficialidad adicional?)

aumentaría o disminuiría en el fondo de un tiro de mina

81. El mar Mediterráneo tiene muy poco sedimento revuelto

profundo? Defiende tu respuesta.

y suspendido en sus aguas, principalmente porque no hay

86. Suele suceder que un aumento real de peso se encuentra

ninguna marea oceánica importante. ¿Por qué crees que

incluso en los tiros de mina más profundos. ¿Qué te dice

el mar Mediterráneo prácticamente no tiene mareas? De

esto acerca de cómo cambia la densidad de la Tierra con

igual modo, ¿existen mareas en el mar Negro? ¿En el gran

la profundidad?

Lago Salado? ¿En el depósito de tu municipio? ¿En un

87. Elabora dos preguntas de opción múltiple: una que

vaso con agua? Explica.

compruebe que un compañero de clase comprendió

82. El cuerpo humano está compuesto principalmente de

la ley del inverso al cuadrado y otra que compruebe la

agua. ¿Por qué la Luna en lo alto provoca un efecto de

diferencia entre peso e ingravidez.

***PIENSA Y DISCUTE** (EVALUACIÓN)*

88. Un amigo dice que arriba de la atmósfera, en territorio del

¿Cuántos metros cuadrados se iluminarán si la pared

transbordador espacial, el campo gravitacional de la Tierra

está a 3 m de la fuente de luz? ¿A 5 m? ¿A 10 m?

es cero. Discute la mala interpretación de tu amigo usando

96. El planeta Júpiter es más de 300 veces más masivo que la

la ecuación de la fuerza gravitacional en tu explicación.

Tierra, de modo que puede parecer que un cuerpo sobre

89. Un amigo afirma que, dado que la gravedad de la Tierra

la superficie de Júpiter pesaría 300 veces más que sobre la

es mucho más intensa que la gravedad de la Luna, las

Tierra. Pero sucede que un cuerpo escasamente pesa tres

rocas sobre la Luna podrían caer a la Tierra. Discute lo

veces más sobre la superficie de Júpiter de lo que pesaría

equivocado de esta suposición.

sobre la superficie de la Tierra. Discute por qué esto es

90. Otro amigo señala que la gravedad de la Luna impediría

así, y usa los términos de la ecuación de la fuerza gravita-

que las rocas cayeran de la Luna a la Tierra, pero que si la

cional para guiar tu razonamiento.

gravedad de la Luna de algún modo ya no tirara sobre sus

97. Dado que tu peso cuando estás parado sobre la Tierra es

propias rocas, entonces las rocas sobre la Luna caerían a

igual a la atracción gravitacional entre tú y la Tierra, dis-

la Tierra. Discute lo equivocado de esta suposición.

cute si tu peso sería o no mayor si la Tierra ganara masa.

91. En alguna parte entre la Tierra y la Luna, la gravedad de

Y si el Sol ganara masa.

estos dos cuerpos sobre una cápsula espacial se cancelaría.

98. Discute y explica por qué este razonamiento es incorrecto:

¿Esta posición está más cerca de la Tierra o de la Luna?

"El Sol atrae a todos los cuerpos sobre la Tierra. A media-

92. La Tierra y la Luna se atraen mutuamente por la fuerza

noche, cuando el Sol está directamente abajo, jala sobre ti

gravitacional. ¿La Tierra más masiva atrae a la Luna menos

en la misma dirección que la Tierra jala sobre ti; a medio-

masiva con una fuerza que es mayor, menor o igual que

día, cuando el Sol está directamente arriba, jala sobre ti

la fuerza con la que la Luna atrae a la Tierra? (Con una

en una dirección opuesta al tirón de la Tierra sobre ti. Por

banda elástica estirada entre el pulgar y el índice, ¿cuál es

tanto, de algún modo debes pesar un poco más a media-

jalado con más fuerza por la banda: tu pulgar o tu índice?)

noche y un poco menos a mediodía".

93. Si la Luna jala a la Tierra tan fuertemente como la Tierra

99. ¿Cuándo será mayor la fuerza gravitacional entre tú y el

jala a la Luna, ¿por qué la Tierra no gira alrededor de la

Sol: hoy a mediodía, o mañana a medianoche? Discute y

Luna, o por qué ambas no giran en torno a un punto a la

defiende tu respuesta.

mitad entre ellas?

100. Si la masa de la Tierra aumentara, tu peso aumentaría en

94. La intensidad de la luz proveniente de una fuente central

correspondencia. Pero, si la masa del Sol aumentara, tu

varía inversamente como el cuadrado de la distancia.

peso no cambiaría en absoluto. Discute por qué esto es así.

Si vivieras en un planeta que estuviera sólo la mitad de

101. ¿El hecho de que un lado de la Luna siempre da la cara

alejado del Sol que la Tierra, ¿cómo se compararía la

a la Tierra significa que la Luna gira en torno a su eje

intensidad de la luz del Sol con la que hay sobre la Tierra?

(como una peonza) o que no gira en torno a su eje? Dis-

¿Y en un planeta 10 veces más alejado que la Tierra?

cute y defiende tu respuesta.

95. Una pequeña fuente luminosa ubicada a 1 m enfrente

102. ¿Cuál sería el efecto sobre las mareas terrestres si el

de una abertura de 1 m2 ilumina una pared detrás de

diámetro de la Tierra fuera mucho mayor de lo que es?

ésta. Si la pared está 1 m detrás de la abertura (2 m

¿Si la Tierra tuviera su tamaño actual pero la Luna fuera

desde la fuente luminosa), el área iluminada cubre 4 m2.

mucho más grande y tuviera la misma masa?

C A PÍ T U LO 9 R E V ISI Ó N

181

103. ¿Cuál produciría las micromareas más grandes en tu

107. Si el Sol se encogiera para convertirse en un agujero negro,

cuerpo: la Tierra, la Luna o el Sol? Discute y defiende tu

discute y demuestra, a partir de la ecuación de fuerza gra-

respuesta.

vitacional, que la órbita de la Tierra no resultaría afectada.

104. Discute por qué las mareas ocurren en la corteza terrestre

108. Si la Tierra fuera hueca pero todavía tuviera la misma masa

y en la atmósfera de la Tierra.

y el mismo radio, ¿tu peso en tu ubicación actual sería

105. Discute cuál necesita más combustible: un cohete que va

mayor, menor o igual que el de ahora? Discute y explica.

de la Tierra a la Luna o un cohete que regresa de la Luna

109. Un nuevo compañero de discusión dice que la Estación

a la Tierra.

Espacial Internacional está fuera del tirón de gravedad de

106. Si de algún modo pudieras hacer un túnel dentro de una

la Tierra, como lo demuestran sus habitantes en una con-

estrella con densidad uniforme, ¿tu peso aumentaría o

dición de ingravidez. Corrige esta mala interpretación.

disminuiría? Si, en vez de ello, de algún modo pudieras

110. Algunas personas desestiman la validez de las teo-

pararte en la superficie de una estrella que se encoge, ¿tu

rías científicas al decir que "sólo son teorías". La ley de

peso aumentaría o disminuiría? Discute por qué difieren

gravitación universal es una teoría. ¿Esto significa que los

tus respuestas.

científicos todavía dudan de su validez? Discute y explica.

¿Por qué estudiar este material, en especial

cuando olvidarás la mayor parte de él? Mi

respuesta es que, ya sea que uses o no este

conocimiento, en el acto de aprender a

relacionar conceptos y resolver problemas

estableces conexiones en tu cerebro que no

existían antes. Es el alambrado de tu cerebro

el que te hace una persona educada.

Dicho alambrado será útil en áreas

que ni siquiera imaginas en este momento.

10 ***1***

C A P Í T U L O 1 0

Movimiento

de proyectiles ***2***

y satélites

10.1 Movimiento de proyectiles

10.2 Proyectiles con movimiento rápido:

satélites

10.3 Órbitas satelitales circulares

3

10.4 Órbitas elípticas

10.5 Leyes de movimiento planetario de Kepler

10.6 Conservación de energía y movimiento de

satélites

10.7 Rapidez de escape

4

1 *La atmósfera de la Tierra es una pequeña fracción del ancho*

de los dedos de Emily Abrams, ¡y la Estación Espacial Internacio-

nal orbita aproximadamente a la distancia de su uña más pequeña!

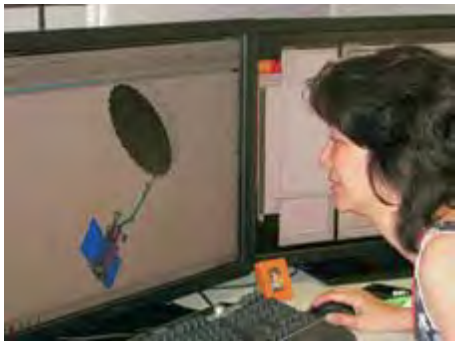
2 *Ben Thoma y Tenny Lim en la "habitación limpia" sin polvo*

del Jet Propulsion Laboratory con el módulo de descenso que

colocó al Curiosity sobre la superficie marciana el 6 de agosto de 2012. ***3*** *Tenny está de pie junto a modelos de los exploradores marcianos que muestran el gran tamaño del Curiosity.*

4 *Shruti Kumar pide a sus estudiantes predecir dónde aterrizará el proyectil en función de una rapidez y ángulo de lanzamiento*

determinados.



C A PÍ T U LO 10 M OV I M I EN TO D E PROY EC T I L ES Y SAT ÉL I T ES

183

La influencia de un profesor no conoce fronteras. Su misiones espaciales, y en fecha más reciente fue la diseñadora influencia sobre los estudiantes trasciende la opinión

principal para la etapa de descenso que llevó al Curiosity a la que recibe de el os. Cuando me preguntan de cuál de

superficie de Marte en 2012.

mis muchos alumnos me siento más orgul oso y a quién he

El proyecto actual de Tenny es la misión Soil Moisture

influido más, mi respuesta es rápida: Tenny Lim. Además

Active Pasive (SMAP, humedad de suelo activa pasiva), que

de ser bril ante, es una artista y muy diestra con sus manos.

diseña y construye un satélite para medir y distinguir entre

Fue la estudiante con mejor calificación de mi clase de Física

la humedad del suelo congelado sobre superficies de la Tie-

Conceptual en 1980 y obtuvo un grado de técnico auxiliar

rra y superficies descongeladas. Las señales hacia y desde

de ciencias en Tecnología de Laboratorio Dental. Con mi la Tierra por medio de una antena de mal a desplegable de motivación y apoyo,

continuó en el City Col ege con cursos

seis metros (véase fotografía)

de matemática y ciencia y decidió hacer la carrera de ingenie-

ofrecen estimaciones mejo-

ría. Dos años después se cambió a la California Polytechnic

radas de las transferencias

State University en San Luis Obispo. Mientras concluía su

de agua, energía y carbono

licenciatura en ingeniería mecánica, un reclutador del Jet entre la Tierra y la atmósfe-Propulsion Laboratory (JPL) en Pasadena quedó impresio-

ra. Tenny es la diseñadora

nado de que el a también tomara clases de arte para equi-

mecánica principal en la

librar sus estudios técnicos. Cuando le preguntó acerca de

parte de la instrumentación

esto, Tenny respondió que el arte era una de sus pasiones. Lo

del satélite. También conti-

que el reclutador buscaba era alguien talentoso tanto en arte

núa con su arte, mucho del cual se exhibe en galerías locales.

como en ingeniería para el equipo de diseño del JPL. Tenny

La historia de Tenny ilustra el consejo que le doy a los

fue contratada en el programa espacial y trabajó en muchas

jóvenes: destaquen en más de una cosa.

10.1 *Movimiento de proyectiles*

Sin gravedad, podrías lanzar una roca en un ángulo hacia el cielo y

seguiría una trayectoria en línea recta. Sin embargo, debido a la gravedad, la trayectoria se curva. Una roca lanzada, una pelota de tenis o cualquier objeto que se proyecte por algún medio y siga en movimiento por su propia inercia se llama ***proyectil****. Para los artilleros de siglos anteriores, las trayectorias curvas de los proyectiles parecían muy complejas. En la actualidad, dichas trayectorias son sorprendentemente simples cuando se observan por separado las componentes horizontal y vertical de la velocidad.*

La componente horizontal de la velocidad para un proyectil no es más complicada que la velocidad horizontal de una bola de boliche que rueda libremente sobre la bolera.

Si el efecto retardador de la fricción puede ignorarse, no hay fuerza horizontal sobre la bola y su velocidad es constante. Rueda con su propia inercia y recorre distancias iguales en intervalos de tiempo iguales (Figura 10.1, izquierda). La componente horizontal del movimiento de un proyectil es exactamente igual al movimiento de la bola de boliche sobre la bolera.

La componente vertical del movimiento para un proyectil que sigue una trayectoria curva es exactamente igual al movimiento descrito en el Capítulo 3 para un objeto en caída libre. La componente vertical es exactamente la misma que para un objeto que cae libremente en línea recta hacia abajo, como se muestra a la derecha en la Figura 10.1.

Cuanto más rápido caiga el objeto, mayor será la distancia recorrida en cada segundo sucesivo. O, si el objeto se proyecta hacia arriba, las distancias verticales de viaje disminuyen con el tiempo en su camino de ascenso.

F I G U R A 1 0 . 1

(Izquierda) Rueda una bola por una superficie nivelada y su velocidad será constante porque ningún componente de la fuerza gravitacional actuará horizontalmente. (Derecha) Suelta la bola y acelerará hacia abajo y recorrerá una mayor distancia vertical cada segundo.

F I G U R A 1 0 . 2

Velocidad de la piedra

Componentes vertical y horizontal de la

velocidad de una piedra.

Componente

vertical de la

velocidad de

la piedra

Componente horizontal de

la velocidad de la piedra

En la Figura 10.2 (idéntica a la Figura 5.27) se ven los vectores que componen la velocidad de una piedra. La componente horizontal de la velocidad es completamente independiente de la componente vertical de la velocidad cuando la resistencia ***VIDEO: Movimiento***

del aire es suficientemente pequeña como para ignorarse. La componente horizontal ***de proyectiles***

constante de la velocidad no es afectada por la fuerza vertical de la gravedad. Es importante resaltar que cada componente es independiente del otro. Sus efectos combinados producen las trayectorias de los proyectiles.

VIDEO: Más movimiento

Proyectiles lanzados horizontalmente

de proyectiles

El movimiento de proyectiles se analiza muy bien en la Figura 10.3, que muestra una exposición estroboscópica simulada de una bola que rueda por el borde de una mesa.

Examínala con mucho cuidado porque hay mucha física muy buena ahí. A la izquierda se observan posiciones secuenciales igualmente cronometradas

de la componente horizontal del movimiento de la bola sin el efecto de la gravedad. A continuación se ve el ***SCREENCAST:***

movimiento vertical sin una componente horizontal. Para analizar mejor la trayectoria ***Caídas laterales***

curva de la tercera figura, hay que considerar por separado las componentes horizontal y vertical del movimiento. Observa dos cosas importantes: la primera es que la componente horizontal de velocidad de la bola no cambia a medida que la bola que cae avanza hacia adelante. La bola recorre la misma distancia horizontal en iguales tiempos entre los destellos. Eso se debe a que no hay componente de fuerza gravitacional que actúe ***SCREENCAST:***

horizontalmente. La gravedad actúa sólo hacia abajo, de modo que la única aceleración ***Lanzamiento de bola***

de la bola es hacia abajo. La segunda cosa que hay que observar es que las posiciones verticales se alejan cada vez más con el tiempo. Las distancias verticales recorridas son las mismas, como las que ocurren si la bola simplemente cayera. Observa que la curvatura de la trayectoria de la bola es la combinación de movimiento horizontal constante y movimiento vertical acelerado.

Movimiento horizontal

Movimiento vertical

Movimientos horizontal

Superposición de los

sin gravedad

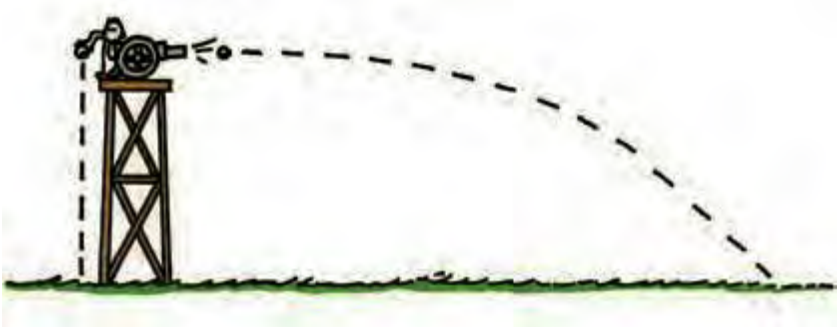
sólo con gravedad

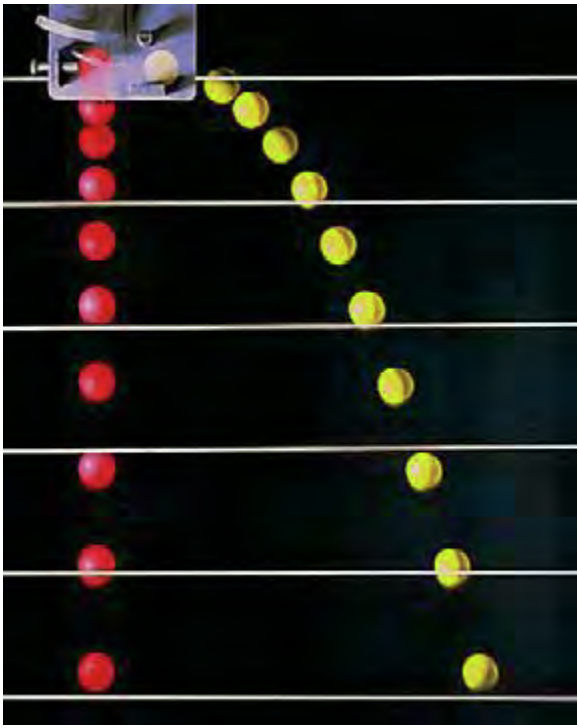
y vertical combinados

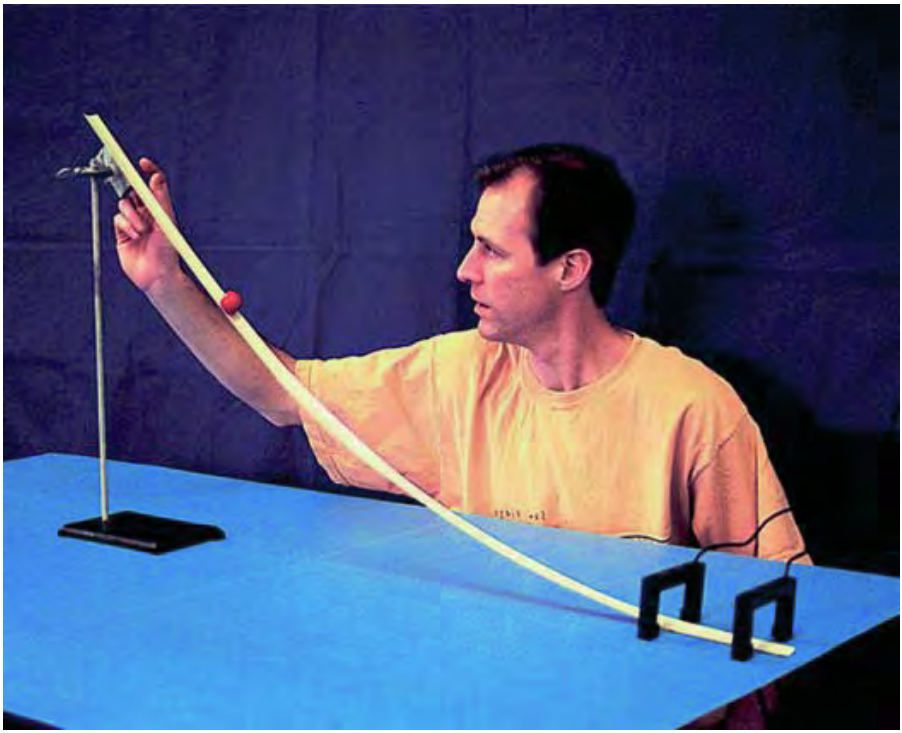
casos anteriores

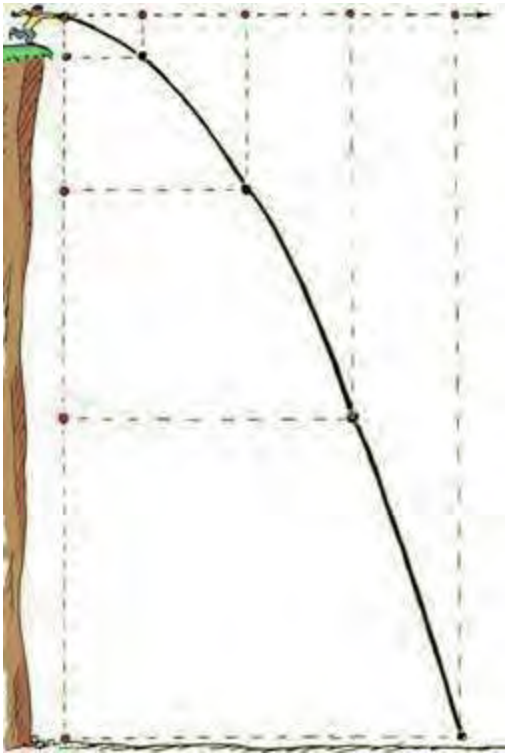
F I G U R A 1 0 . 3

Fotografías simuladas de una bola en movimiento iluminada con una luz estroboscópica.









C A PÍ T U LO 10 M OV I M I EN TO D E PROY EC T I L ES Y SAT ÉL I T ES

185

La trayectoria de un proyectil que acelera sólo en la dirección vertical mientras se mueve con una velocidad horizontal constante es una ***parábola****. Cuando la resistencia del aire es suficientemente pequeña como para ignorarse, como sucede con un objeto pesado sin gran rapidez, la trayectoria del objeto es parabólica.*

P U N T O D E C O N T R O L

En el instante cuando un cañón dispara horizontalmente una bala sobre un prado aplanado, otra bola de cañón que se mantiene al lado del cañón se libera y cae hacia el suelo. ¿Cuál bola golpea primero el suelo: la que se disparó horizontalmente o la que se soltó desde el reposo?

F I G U R A 1 0 . 4

Fotografía estroboscópica de dos bolas

de golf soltadas al mismo tiempo desde

un mecanismo que permite a una bola

caer libremente mientras la otra se pro-

yecta de manera horizontal.

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Ambas bolas de cañón golpean el suelo al mismo tiempo, pues ambas caen la misma distancia vertical. Observa que la física es la misma que se muestra en las Figuras 10.3

y 10.4. Esto se puede razonar de otra forma si preguntas cuál golpearía primero el suelo si el cañón se apuntara en un ángulo hacia arriba. Entonces la bala soltada golpearía primero, en tanto que la bala disparada seguiría en el aire. Ahora considera que el cañón apunta hacia abajo. En este caso, la bola disparada golpearía primero.

De modo que, proyectada hacia arriba, la que se suelta golpea primero; hacia abajo, la disparada golpea primero. ¿Existe algún ángulo en el que haya empate, donde ambas golpeen al mismo tiempo? ¿Puedes ver que esto ocurre cuando el cañón está horizontal?

F I G U R A 1 0 . 5

F I G U R A 1 0 . 6

Chuck Stone suelta una bola cerca de lo alto de una pista. Sus

La línea punteada vertical es la trayectoria de una piedra soltada

estudiantes realizan mediciones para predecir dónde debe colo-

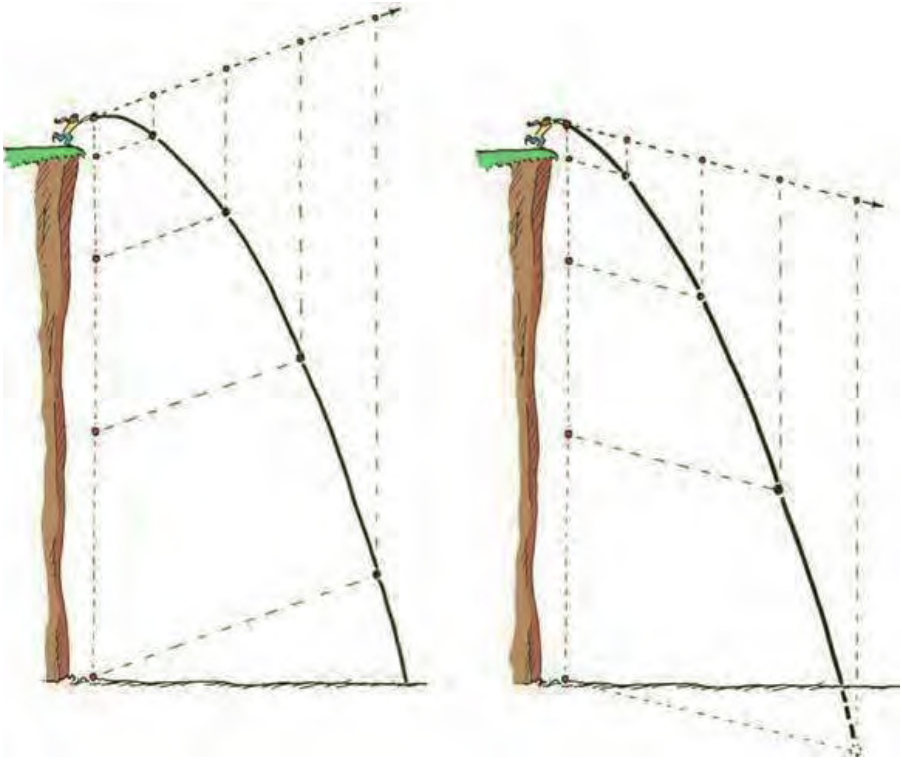
desde el reposo. La línea punteada horizontal sería su trayectoria

carse una lata en el suelo para que atrape la bola después de que

si no hubiera gravedad. La línea curva muestra la trayectoria que

ruede y salga de la mesa.

combina los movimientos horizontal y vertical.



F I G U R A 1 0 . 7

Ya sea que se lance con un ángulo ascendente o descendente, la dis-

tancia vertical de caída debajo de

la trayectoria idealizada en línea recta

es la misma para tiempos iguales.

Proyectiles lanzados en un ángulo

En la Figura 10.7 se ven las trayectorias de piedras lanzadas con un ángulo hacia arriba (izquierda) y hacia abajo (derecha). Las líneas rectas punteadas muestran las trayectorias ideales de las piedras si no hubiera gravedad. Observa que la distancia vertical abajo de las trayectorias idealizadas en línea recta es la misma para tiempos iguales.

SCREENCAST: El problema de

Esta distancia vertical es independiente de lo que ocurre horizontalmente.

la pelota de tenis

La Figura 10.8 muestra distancias verticales específicas para una bala de cañón disparada con un ángulo hacia arriba. Si no hubiera gravedad, la bala de cañón seguiría la trayectoria en línea recta que se muestra con la línea punteada. Pero hay gravedad, de modo que esto no ocurre. Lo que realmente sucede es que la bala de cañón cae continuamente debajo de la línea imaginaria hasta que finalmente golpea el suelo. Observa que la distancia vertical que cae debajo de cualquier punto sobre la línea punteada es la misma distancia vertical que caería si se soltara desde el reposo y hubiera caído durante la misma cantidad de tiempo. Esta distancia, como se propuso en el Capítulo 3, está dada por $d = \frac{1}{2}gt^2$*, donde t es el tiempo transcurrido.*

Para decirlo de otra manera: imagina que lanzas un proyectil hacia el cielo con cierto ángulo y que no hay gravedad. Después de muchos segundos t, el proyectil debe estar en ***F I G U R A 1 0 . 8***

Sin gravedad, el proyectil seguiría una

trayectoria en línea recta (línea puntea-

da). Pero, debido a la gravedad, el pro-

yectil cae debajo de esta línea la misma

distancia vertical que caería si se soltara

desde el reposo. Compara las distancias

que cae con las dadas en la Tabla 3.3

45 m

del Capítulo 3. (Con g 9.8 m/s2, tales

distancias son más precisamente 4.9 m,

20 m

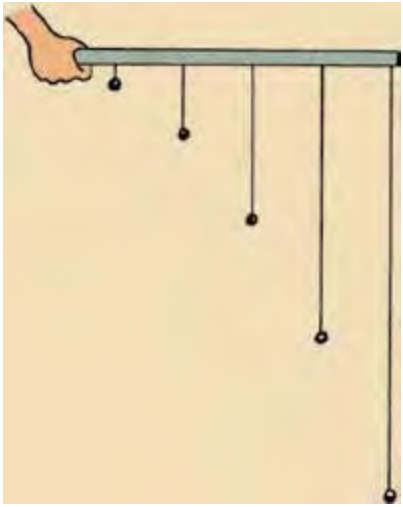
19.6 m y 44.1 m.)

5 m

1 s

2 s

3 s



C A PÍ T U LO 10 M OV I M I EN TO D E PROY EC T I L ES Y SAT ÉL I T ES

187

PRACTICANDO LA FÍSICA: CUENTAS COLGANTES PRÁCTICAS

Elabora tu propio modelo de trayectorias de proyectiles. Divide una regla o una vara en cinco espacios iguales. En la posición 1, cuelga una cuenta de una cuerda que mida 1 cm de largo, como se muestra. En la posición 2, cuelga una cuenta de una cuerda que mida 4 cm de largo. En la posición 3, haz lo mismo con una cuerda de 9 cm de largo. En la posición 4, usa 16 cm de cuerda, y para la posición 5, usa 25 cm de cuerda. Si sostienes la vara horizontalmente, tendrás una versión de la Figura 10.6. Sostenla en un ligero ángulo hacia arriba para mostrar una versión de la Figura 10.7, izquierda. Y en un ángulo hacia abajo para mostrar una versión de la

Figura 10.7, derecha.

cierto punto a lo largo de una trayectoria en línea recta. Pero, debido a la gravedad, no lo está. ¿Dónde está? La respuesta es que está directamente debajo de este punto. ¿Qué tan abajo? La respuesta en metros es 5 t 2 (o, más precisamente, 4.9 t 2). ¡Qué tal!

Observa otra cosa en la Figura 10.8 y las figuras anteriores. La bola se mueve iguales distancias horizontales en iguales intervalos de tiempo. Esto es porque no ocurre ninguna aceleración en sentido horizontal. La única aceleración es vertical, en la dirección de la gravedad de la Tierra.

P U N T O D E C O N T R O L

Peter Rea, de Arbor Scientific, produce

***1. Supón que la bala de cañón de la Figura 10.8 se dispara más rápido. ¿A** este lanzador de proyectiles impulsado*

cuántos metros por debajo de la línea punteada estaría al final de 5 s?

por aire para aulas de física en exteriores.

2. Si la componente horizontal de la velocidad de la bala de cañón es 20 m/s,

¿a qué distancia horizontal estará la bala de cañón en 5 s?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

***1.** La distancia vertical por debajo de la línea punteada al final de 5 s es 125 m*

[d 5 5 t 2 5 5(5)2 5 5(25) 5 125 m]. Es muy interesante que esta distancia no dependa del ángulo del cañón. Si se desprecia la resistencia aerodinámica, cualquier proyectil caerá 5 t 2 abajo de donde habría llegado si no hubiera gravedad.

***2.** Sin resistencia aerodinámica, la bala de cañón recorrerá una distancia horizontal de 100 m [d 5 vt 5 (20 m/s)(5 s) 5 100 m]. Observa que, dado que la gravedad sólo actúa verticalmente y no hay aceleración en la dirección horizontal, la bala de cañón recorre una distancia horizontal igual en tiempos iguales. Esta distancia es simplemente su componente horizontal de velocidad multiplicado por el tiempo (y no 5 t 2, que sólo se aplica al movimiento vertical bajo la aceleración de la gravedad).*

En la Figura 10.9 se ven vectores que representan las componentes horizontal y vertical de velocidad de un proyectil que sigue una trayectoria parabólica. Observa que la componente horizontal en todas partes a lo largo de la trayectoria es la misma, y sólo cambia la componente vertical. La velocidad real se representa con el vector que es la diagonal del rectángulo formado por las componentes vectoriales.

En la parte superior de la trayectoria, la componente vertical es cero, de modo que la velocidad en el cenit sólo es la componente horizontal de velocidad. En todas las demás partes a lo largo de la trayectoria, la magnitud de la velocidad es mayor (tal como la diagonal de un rectángulo es mayor que cualquiera de sus lados).

FIGURA 10.9
Velocidad de un proyectil en varios puntos a lo largo de su trayectoria. Observa que la componente vertical cambia y que la componente horizontal es la misma en todas partes.

La Figura 10.10 muestra la trayectoria trazada por un proyectil lanzado con la misma rapidez a un ángulo más inclinado. Observa que el vector de velocidad inicial tiene una componente vertical más grande que cuando el ángulo de lanzamiento es más pequeño. Esta componente más grande resulta en una trayectoria que alcanza mayor altura. Pero la componente horizontal es menor y el alcance es menor.

La Figura 10.11 muestra las trayectorias de varios proyectiles, todos con la misma rapidez inicial pero diferentes ángulos de lanzamiento. La figura desprecia los efectos de la resistencia aerodinámica, de modo que las trayectorias son todas parábolas. Observa que dichos proyectiles alcanzan diferentes altitudes, o alturas, sobre el suelo. También tienen diferentes alcances horizontales, o distancias recorridas horizontalmente. ¡Lo que es sorprendente observar en la Figura 10.11 es que se obtiene el mismo alcance a partir de dos diferentes ángulos de lanzamiento cuando los ángulos suman 908! Un objeto lanzado al ***F I G U R A 1 0 . 1 0***

aire con un ángulo de 608, por ejemplo, tendría el mismo alcance que si se lanzara con la Trayectoria cuando el ángulo de proyec-misma rapidez con

un ángulo de 308. Desde luego, para el ángulo menor, el objeto perma-ción es más inclinado.

nece en el aire durante un tiempo más corto. El alcance máximo ocurre cuando el ángulo de lanzamiento es de 458, cuando la resistencia aerodinámica es despreciable.

F I G U R A 1 0 . 1 1

Alcances horizontales de un proyectil

disparado con la misma rapidez con

diferentes ángulos de proyección.

75°

60°

45°

30°

15°

P U N T O D E C O N T R O L

1. Una pelota de béisbol se batea con cierto ángulo en el aire. Una vez en el aire, y si desprecias la resistencia aerodinámica, ¿cuál es la aceleración vertical de la pelota? ¿La horizontal?

2. ¿En qué parte de su trayectoria la pelota de béisbol tiene rapidez mínima?

3. Piensa en una pelota de béisbol bateada que sigue una trayectoria parabólica en un día cuando el Sol está directamente arriba. ¿Cómo se compara la rapidez de la sombra de la pelota que cruza el campo con la componente horizontal de velocidad de la pelota?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *La aceleración vertical es g (directamente hacia abajo) porque la fuerza de gravedad es vertical. La aceleración horizontal es cero porque ninguna fuerza horizontal actúa sobre la pelota.*

2. *La rapidez mínima de una pelota ocurre en la parte superior de su trayectoria.*

Si se lanza verticalmente, su rapidez en la parte superior es cero. Si se lanza con un ***F I G U R A 1 0 . 1 2***

ángulo, la componente vertical de velocidad es cero en la parte superior, lo que sólo El alcance máximo se lograría cuando

deja a la componente horizontal. De modo que la rapidez en la parte superior es igual la pelota se bateara con un ángulo de

a la componente horizontal de la velocidad de la pelota en cualquier punto. ¿No tiene 458, pero sólo en ausencia de resistencia

sentido esto?

aerodinámica.

3. *¡Son iguales!*

Si se ignoran los efectos de la resistencia aerodinámica, el alcance máximo para una pelota de béisbol ocurriría cuando se batea 458 arriba de la horizontal. Sin resistencia aerodinámica, la pelota sube exactamente lo que cae, y recorre la misma cantidad de terreno mientras se eleva que mientras cae. Pero no es así cuando la resistencia aerodinámica frena la pelota. Entonces su rapidez horizontal en la parte superior de su trayectoria es menor que su rapidez horizontal cuando deja el bate,

de modo que recorre menos terreno mientras cae que cuando

se eleva. Como resultado, para un alcance máximo, la pelota

debe dejar el bate con más rapidez horizontal que rapidez ver-

Trayectoria

tical, a cerca de 25 a 348, considerablemente menos que 458.

ideal

Lo mismo ocurre con las bolas de golf. (Como se demostrará

en el Capítulo 14, el giro de la bola también afecta el alcan-

Trayectoria real

ce.) Para proyectiles pesados, como las jabalinas y la bala, el

aire tiene menos efecto sobre el alcance. Una jabalina, por ser

pesada y presentar un área transversal muy pequeña al aire,

sigue una parábola casi perfecta cuando se lanza. Lo mismo

ocurre con una bala. Ajá, pero las rapideces de lanzamiento

FIGURA 10.13

no son iguales para los proyectiles pesados lanzados con dife-

En presencia de resistencia del aire, la trayectoria de un proyectil

rentes ángulos. Cuando se lanza una jabalina o una bala, una

con gran rapidez se queda corta con respecto a la trayectoria

parabólica idealizada.

parte significativa de la fuerza de lanzamiento se va en levantar (combatir la gravedad), de modo que lanzar a 458 significa

menos rapidez de lanzamiento. Puedes poner esto a prueba tú mismo: lanza una pesada roca horizontalmente y luego con un ángulo hacia arriba; descubrirás que el lanzamiento horizontal es mucho más rápido. De modo que el alcance máximo para los proyectiles pesados lanzados por seres humanos se logra con ángulos me-10 m/s

10 m/s

nores que 348, y no por la resistencia del aire.

Cuando la resistencia del aire es suficientemente pequeña como para despreciarse, 20 m/s

20 m/s

un proyectil se elevará a su altura máxima en el mismo tiempo que tarde en caer desde dicha altura hasta su nivel inicial (Figura 10.14). Esto se debe a que su desaceleración por la gravedad mientras sube es la misma que su aceleración por la gravedad mientras baja. Por tanto, la rapidez que pierde mientras sube es la misma que la rapidez que gana 30 m/s

30 m/s

mientras baja. De modo que el proyectil llega a su nivel inicial con la misma rapidez que tenía cuando se proyectó inicialmente.

Los juegos de béisbol por lo general tienen lugar en terrenos llanos. Para el movimiento de proyectiles de corto alcance sobre el campo de juego, la Tierra puede con-40 m/s

siderarse plana porque el vuelo de la pelota no se afecta con la curvatura de la Tierra.

40 m/s

Sin embargo, en el caso de proyectiles de muy largo alcance, debe tenerse en cuenta la curvatura de la superficie de la Tierra. Ahora verás que, si un objeto se proyecta suficientemente rápido, caerá todo el tiempo alrededor de la Tierra y se convertirá en un satélite terrestre.

F I G U R A 1 0 . 1 4

Sin resistencia aerodinámica, la rapidez

perdida mientras sube es igual a la rapi-

P U N T O D E C O N T R O L

dez ganada mientras baja: el tiempo de

***El chico sobre la torre lanza una bola a 20 m de distancia, como se muestra en** subida es igual al tiempo de bajada.*

la Figura 10.15. ¿Cuál es su rapidez de lanzamiento?

5 m

20 m

F I G U R A 1 0 . 1 5

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

La bola se lanza horizontalmente, de modo que la rapidez de lanzamiento es distancia horizontal divida entre tiempo. Se proporciona una distancia horizontal de 20 m, pero no se establece el tiempo. Sin embargo, al saber que la caída vertical es de 5 m, ¡recuerdas que una caída de 5 m tarda 1 s! De acuerdo con la ecuación para rapidez constante (que se aplica al movimiento horizontal), v 5 d/ t 5 (20 m)/(1 s) 5 20 m/s. Es interesante observar que la ecuación para rapidez constante, v 5 d/t, guía tu razonamiento acerca del factor crucial de este problema: el tiempo.

NUEVA VISITA AL “TIEMPO DE VUELO”

En el Capítulo 3 se estableció una diferencia. Si el jugador corre, la que el tiempo en el aire durante

fuerza de despegue durante el salto

un salto es independiente de la

puede aumentar en forma considerable

rapidez horizontal. Ahora verás por qué:

al golpear los pies contra el suelo (y el

las componentes horizontal y vertical

suelo, golpear contra los pies en forma de

del movimiento son independientes

acción-reacción), de modo que el tiempo

entre sí. Las reglas del movimiento de

en el aire de un salto que se da corriendo

proyectiles se aplican al salto. Una vez

puede superar el "tiempo de vuelo" de un

que el pie se despega del suelo, sólo la

salto de pie. Pero, se subraya de nuevo:

fuerza de gravedad actúa sobre el saltador

una vez que los pies del corredor se

(si desprecias la resistencia del aire).

despegan del suelo, sólo la componente

El tiempo en el aire sólo depende de

vertical de la velocidad de despegue

la componente vertical de la velocidad

determina el tiempo en el aire.

de despegue. Sin embargo, sucede que

la acción de correr puede representar

***10.2** Proyectiles con movimiento rápido: satélites*

Considera al lanzador de béisbol sobre la torre de la Figura 10.15. Si la gravedad no actuara sobre la bola, la bola seguiría la trayectoria en línea recta que se muestra con la línea punteada. Lo mismo sucedería con la bola lanzada por la niña de la Figura 10.16.

Pero la gravedad sí actúa, de modo que la bola cae por debajo de estas trayectorias en La curvatura de la Tierra cae 5 m

por cada 8 km de tangente, lo

línea recta. De hecho, como se acaba de señalar, 1 s después de que la bola abandone la que significa que, si flotaras en un

mano del lanzador, habrá caído una distancia vertical de 5 m debajo de la línea puntea-océano en calma, sólo podrías ver la

da, cualquiera que sea la rapidez de lanzamiento. Es importante entender esto, pues es el parte superior de un mástil de 5 m

quid del movimiento de los satélites.

en un barco a 8 km de distancia.

5 m

5 m

5 m

F I G U R A 1 0 . 1 6

Si lanzas una bola con cualquier rapidez, 1 s después habrá caído 5 m abajo de donde habría estado sin gravedad.

*Un **satélite** terrestre es tan sólo un proyectil que cae alrededor de la Tierra en lugar de hacia ella. La rapidez del satélite debe ser suficientemente grande para garantizar que su distancia de caída coincida con la curvatura de la Tierra. Un hecho geométrico sobre la curvatura de la Tierra es que su superficie cae una distancia vertical de 5 m por cada 8,000 m de tangente respecto de la superficie (Figura 10.18). Si una pelota de béisbol pudiera lanzarse tan rápido que recorriera una distancia horizontal de 8 km*

durante el segundo que tarda en caer 5 m, entonces seguiría la curvatura de la Tierra. Ésta es una rapidez de 8 km/s. Si no te parece rápido, ¡conviértela a kilómetros por hora y obtendrás unos impresionantes 29,000 km/h (o 18,000 mi/h)!

FIGURA 10.17

Si la rapidez de la piedra es suficiente-

mente grande, la piedra se convierte en

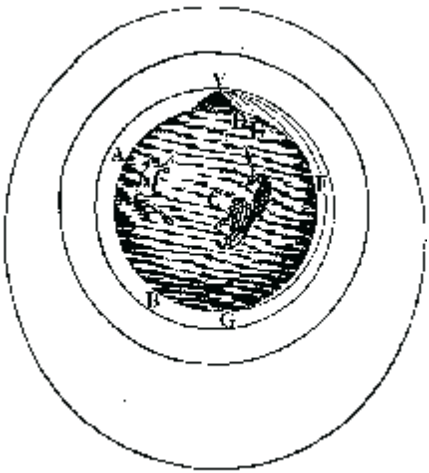
8,000 m

un satélite.

5 m

FIGURA 10.18

Curvatura de la Tierra, ¡no está a escala!



A esta rapidez, la fricción atmosférica quemaría la pelota

FIGURA 10.19

de béisbol, o incluso un pedazo de hierro. Éste es el destino de

“Cuanto mayor sea la velocidad… con

los fragmentos de roca y otros meteoritos que entran en la at-

la que se proyecte (una piedra), más lejos

mósfera de la Tierra y se queman, y aparecen como “estrel as

llegará antes de caer a la Tierra. Por

tanto, es posible suponer que la veloci-

fugaces”. Es por esto que los satélites se lanzan a altitudes de

dad aumenta tanto que describiría

150 km o más, para que estén arriba de casi toda la atmósfera

un arco de 1, 2, 5, 10, 100, 1,000 millas

y casi sin resistencia del aire. Suele tenerse la idea equivocada

antes de llegar a la Tierra, hasta que al

de que los satélites que orbitan a grandes alturas están libres de

final, al superar los límites de la Tierra,

gravedad. Nada podría estar más lejos de la verdad. La fuerza

entraría al espacio sin tocarla.”— Isaac

de gravedad sobre un satélite que está a 200 km de la super-

Newton, Sistema del mundo.

ficie de la Tierra es casi tan fuerte como lo es en la superficie.

La razón para colocarlo a esa gran altitud es que el satélite esté lejos de la atmósfera de la Tierra, donde prácticamente no haya resistencia del aire, pero no para que esté fuera de la gravedad de la Tierra.

Isaac Newton entendió el movimiento de los satélites y razonó que la Luna era simplemente un proyectil que orbitaba la Tierra bajo la atracción de la gravedad. Este concepto se ilustra en un dibujo de Newton (Figura 10.19). Comparó el movimiento de la Luna con el de una bala de cañón disparada desde el punto más alto de una gran montaña. Imaginó que la cima de la montaña estaba arriba de la atmósfera de la Tierra, de modo que la resistencia del aire no impediría el movimiento de la bala de cañón. Si se disparara con una rapidez horizontal baja, una bala de cañón seguiría una trayectoria curva y pronto golpearía la Tierra abajo. Si se disparara más rápido, su trayectoria sería menos curva y golpearía la Tierra más lejos. Si la bala de cañón se disparara suficientemente rápido, Newton razonó que la trayectoria curva se volvería un círculo y la bala de cañón daría vueltas a la Tierra indefinidamente. Estaría en órbita.

Tanto la bala de cañón como la Luna tienen una velocidad tangencial (paralela a la superficie de la Tierra) que es suficiente para asegurar el movimiento alrededor de la Tierra en lugar de hacia ella. Si no hay resis- ***F I G U R A 1 0 . 2 0***

Un satélite terrestre es un proyectil

tencia que reduzca su rapidez, la Luna o cualquier satélite terrestre "cae" alrededor en un estado de caída libre constante.

de la Tierra de manera indefinida. De igual modo, los planetas continuamente caen Debido a su velocidad tangencial, cae alrededor del Sol en trayectorias cerradas. ¿Por qué los planetas no chocan con el Sol? alrededor de la Tierra en lugar de verti-No lo hacen debido a sus velocidades tangenciales. ¿Qué ocurriría si sus velocidades calmente hacia ella.

tangenciales se redujeran a cero? La respuesta es muy simple: caerían en línea recta hacia el Sol y de hecho chocarían con él. Cualquier objeto en el sistema solar sin suficiente velocidad tangencial hace mucho tiempo que habría chocado con el Sol.

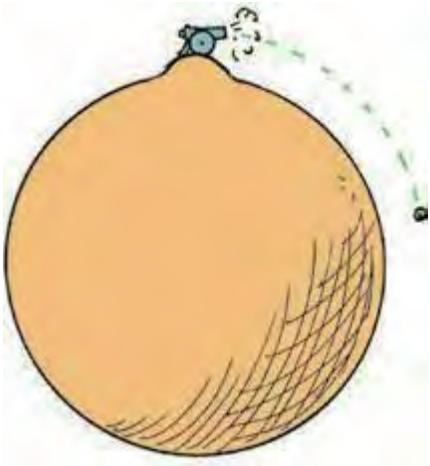
Lo que queda es la armonía que observas.

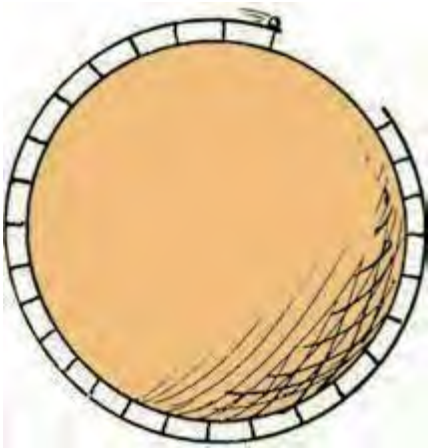
P U N T O D E C O N T R O L

Una de las bellezas de la física es que suele haber diferentes formas de ver y explicar un fenómeno dado. ¿La siguiente explicación es válida? Los satélites permanecen en órbita en lugar de caer a la Tierra porque están lejos del tirón principal de la gravedad de la Tierra.

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

¡No, no y mil veces no! Si un objeto en movimiento estuviera lejos del tirón de la gravedad, se movería en línea recta y no seguiría la curvatura de la Tierra. Los satélites permanecen en órbita porque son jalados por la gravedad, no porque estén fuera de ella. Para las altitudes de la mayor parte de los satélites terrestres, el campo gravitacional de la Tierra sólo es un pequeño porcentaje más débil de lo que es en la superficie de la Tierra.





***10.3** Órbitas satelitales circulares*

Una bala de cañón disparada horizontalmente a 8 km/s desde la montaña de Newton seguiría la curvatura de la Tierra y se deslizaría en una

trayectoria circular alrededor de la Tierra una y otra vez (siempre que el artillero y el cañón salieran de su camino). Disparada con una rapidez más lenta, la bala de cañón golpearía la superficie de la Tierra; disparada con una rapidez mayor, llegaría más allá de la órbita circular, como verás dentro de poco. Newton calculó la rapidez para una órbita circular, y dado que tal velocidad de bala de cañón evidentemente era imposible, no previó la posibilidad de que los seres humanos lanzaran satélites (y probablemente no pensó en cohetes multietapas).

F I G U R A 1 0 . 2 1

Observa que, en una órbita circular, la rapidez de un satélite no cambia por la Disparada con suficiente rapidez, la bala gravedad: la gravedad sólo cambia la dirección. Puedes entender esto si comparas un de cañón entrará en órbita.

satélite en órbita circular con una bola de boliche que rueda por una bolera. ¿Por qué la gravedad que actúa sobre la bola de boliche no cambia su rapidez? La respuesta es que la gravedad jala recto hacia abajo sin ningún componente de fuerza que actúe hacia adelante o hacia atrás.

Bolera arriba de

Dirección de

la atmósfera

movimiento

Fuerza de

gravedad

Tierra

(a)

(b)

F I G U R A 1 0 . 2 2

(a) La fuerza de gravedad sobre la bola de boliche está a 908 respecto de su dirección de movimiento, de modo que no tiene ningún componente de fuerza que la jale hacia adelante o atrás, y la bola ***VIDEO: Órbitas circulares***

rueda con rapidez constante. (b) Lo mismo sucede incluso si la bolera es

más grande y permanece

"pareja" con la curvatura de la Tierra.

Piensa en una bolera que circunda por completo la Tierra, elevada lo suficiente como para estar arriba de la atmósfera y de la resistencia del aire. La bola de boliche rodará con rapidez constante a lo largo de la bolera. Si una parte de la bolera se recortara, la bola se saldría por la orilla y golpearía el suelo. Una bola más rápida que encontrara la brecha golpearía el suelo más lejos a lo largo de la brecha. ¿Existe una rapidez a la cual la bola libre la brecha (como un motociclista que salta de una rampa y libra una brecha para encontrar una rampa en el otro lado)? La respuesta es sí: 8 km/s será la rapidez suficiente para librar cualquier brecha, incluso una brecha de 3608. La bola estaría en órbita circular.

F I G U R A 1 0 . 2 3

Observa que un satélite en órbita circular siempre se mueve en una dirección per-

¿Qué rapidez permitirá que la bola libre

pendicular a la fuerza de gravedad que actúa sobre él. El satélite no se mueve en la di-la brecha?

rección de la fuerza, lo que aumentaría su rapidez, ni se mueve en una dirección contra la fuerza, lo que reduciría su rapidez. En vez de ello, el satélite se mueve en ángulos rectos con respecto a la fuerza gravitacional que actúa sobre él. No ocurre cambio de rapidez, sólo un cambio de dirección. Ahora ves por qué un satélite en órbita circular navega paralelo a la superficie de la Tierra con rapidez constante, una forma muy especial de caída libre.

Para un satélite que está cerca de la Tierra, el periodo (el tiempo necesario para una órbita completa en torno a la Tierra) es de aproximadamente 90 minutos. Para altitudes mayores, la rapidez orbital es menor, la distancia es mayor y el periodo es más largo. Por ejemplo, los satélites de comunicaciones ubicados en órbita a 5.6 radios terrestres sobre la superficie de la Tierra tienen un periodo de 24 horas. Este periodo coincide con el periodo de rotación diario de la Tierra. Para una órbita alrededor del ecuador, dichos sa-SCREENCAST: Rapidez de satélite

télites siempre permanecen arriba del mismo punto sobre el suelo. La Luna está incluso

C A PÍ T U LO 10 M OV I M I EN TO D E PROY EC T I L ES Y SAT ÉL I T ES

193

F I G U R A 1 0 . 2 4

8 km/s

El empuje inicial del cohete lo lanza por

encima de la atmósfera. Se necesita otro

empuje para que alcance una rapidez

tangencial de al menos 8 km/s si se

quiere que el cohete caiga alrededor en

vez de hacerlo hacia la Tierra.

más lejos y tiene un periodo de 27.3 días. Cuanto más alta sea la órbita de un satélite, El ascenso vertical inicial lleva a un

menor será su rapidez, más larga será su trayectoria y más largo será su periodo.1

cohete rápidamente a través de la

Poner un satélite en órbita terrestre exige controlar la rapidez y la dirección del parte más densa de la atmósfera.

cohete que lo lleva encima de la atmósfera. Un cohete disparado en un inicio en Con el tiempo, el cohete debe

sentido vertical se inclina intencionalmente del curso vertical. Luego, una vez arriba adquirir suficiente rapidez tangen-de la resistencia de la atmósfera, se dirige horizontalmente, después de lo cual al cial para permanecer en órbita sin

empuje, de modo que debe incli-

satélite se le da un empuje final para que alcance la rapidez orbital. Esto se ve en la narse hasta que su trayectoria sea

Figura 10.24, donde, por cuestiones de simplicidad, el satélite es de una sola etapa.

paralela a la superficie de la Tierra.

Con la velocidad tangencial correcta, cae alrededor de la Tierra, en lugar de hacerlo hacia ella, y se convierte en un satélite terrestre.

P U N T O D E C O N T R O L

1. Cierto o falso: los vehículos espaciales orbitan a altitudes superiores a los 150 km para estar arriba tanto de la gravedad como de la atmósfera terrestre.

2. Los satélites en órbita circular cercana caen aproximadamente 5 m durante cada segundo de órbita. ¿Por qué esta distancia no se acumula y envía a los satélites a chocar en la superficie de la Tierra?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Falso. Los satélites están arriba de la atmósfera y de la resistencia del aire, ¡ no de la gravedad! Es importante señalar que la gravedad de la Tierra se extiende por todo el Universo de acuerdo con la ley del inverso al cuadrado.*

2. *En cada segundo, el satélite cae aproximadamente 5 m debajo de la*

tangente en línea recta que habría seguido si no hubiera gravedad. La superficie de la Tierra también se curva 5 m bajo una tangente recta de 8 km. El proceso de caer con la curvatura de la Tierra continúa de tangente a tangente, de modo que la trayectoria curva del satélite y la curva de la superficie de la Tierra "coinciden" todo el tiempo alrededor del planeta. De hecho, los satélites

8 km

chocan con la superficie de la Tierra algunas veces, esto

8 km

sucede cuando encuentran resistencia del aire en la atmós-

fera superior que reduce su rapidez orbital.

8

5 m

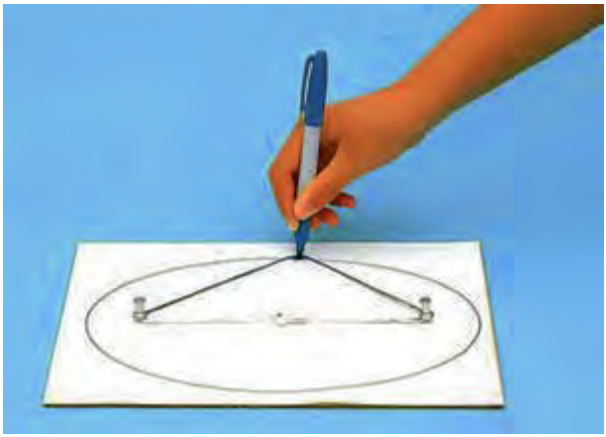
km

1La rapidez de un satélite en órbita circular está dada por v = # GM

d y el periodo del movimiento del satélite

está dado por T = 2p# d 3

GM , donde G es la constante de gravitación universal (consulta el Capítulo 9), M es la masa de la Tierra (o cualquier cuerpo que orbite el satélite) y d es la distancia del satélite respecto del centro de la Tierra u otro cuerpo que orbite.



***10.4** Órbitas elípticas*

Si a un proyectil justo arriba de la resistencia de la atmósfera se le da una rapidez horizontal un poco mayor que 8 km/s, saldrá de una trayectoria circular y trazará una trayectoria oval llamada ***elipse****. Una elipse es una curva específica: la trayectoria cerrada seguida por un punto que se mueve en tal forma que la suma de sus distancias desde dos puntos fijos (llamados focos) es constante. Para un satélite que orbita un planeta, un foco está en el centro del planeta; el otro foco podría ser interno o externo al planeta. Una elipse puede construirse fácilmente con un par de* ***F I G U R A 1 0 . 2 5***

tachuelas (una en cada foco), un trozo de cuerda y una pluma o marcador (Figura Un método simple para construir una

10.25). Cuanto más juntos estén los focos uno de otro, la elipse estará más

cerca elipse.

de ser un círculo. Cuando ambos focos coinciden, la elipse es un círculo. Así que puedes ver que un círculo es un caso especial de elipse.

Mientras que la rapidez de un satélite es constante en una órbita circular, la rapidez varía en una órbita elíptica. Cuando la rapidez inicial es mayor que 8 km/s, el satélite sale de una trayectoria circular y se aleja de la Tierra, contra la fuerza de gravedad. Por tanto pierde rapidez. La rapidez que pierde al alejarse vuelve a ganarla cuando cae de vuelta hacia la Tierra, y al final recupera su trayectoria original con la misma rapidez que tenía en un inicio (Figura 10.27). El procedimiento se repite una y otra vez, y en cada ciclo se traza una elipse.

F I G U R A 1 0 . 2 6

Tres lámparas que iluminan sobre la

bola proyectan sombras que son todas

elipses.

(a)

(b)

(c)

SCREENCAST: Órbita

F I G U R A 1 0 . 2 7

circular/elíptica

Órbita elíptica. (a) Un satélite terrestre que tiene una rapidez un poco mayor que 8 km/s sale de una órbita circular y se aleja de la Tierra. (b) La gravedad frena al satélite hasta el punto donde ya no puede alejarse más de ella. (c) Cae hacia la Tierra, recupera la rapidez que pierde al alejarse, y sigue la misma trayectoria que antes en un ciclo repetitivo.

F I G U R A 1 0 . 2 8

Es muy interesante que la trayecto-

(a) La trayectoria de la bala de cañón,

ria parabólica de un proyectil, como

aunque se aproxima a una parábola, en

una pelota de béisbol lanzada o una

x

realidad es parte de una elipse. El centro

bala de cañón, en realidad es un pe-

de la Tierra es el foco lejano. (b) Todas

queño segmento de una elipse esmi-

las trayectorias de la bala de cañón

son elipses. Para rapideces menos que

rriada (delgada) que se extiende dentro

Centro de

orbitales, el centro de la Tierra es el foco

y justo más allá del centro de la Tierra

la Tierra

lejano; para una órbita circular, ambos

(Figura 10.28a). En la Figura 10.28b

x

focos son el centro de la Tierra; para

se ven varias trayectorias de balas de

rapideces mayores, el foco cercano es el

(a)

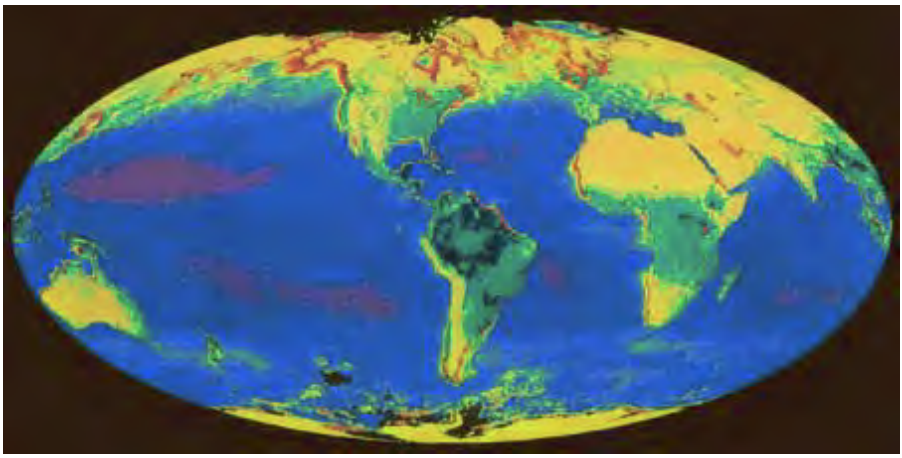
(b)

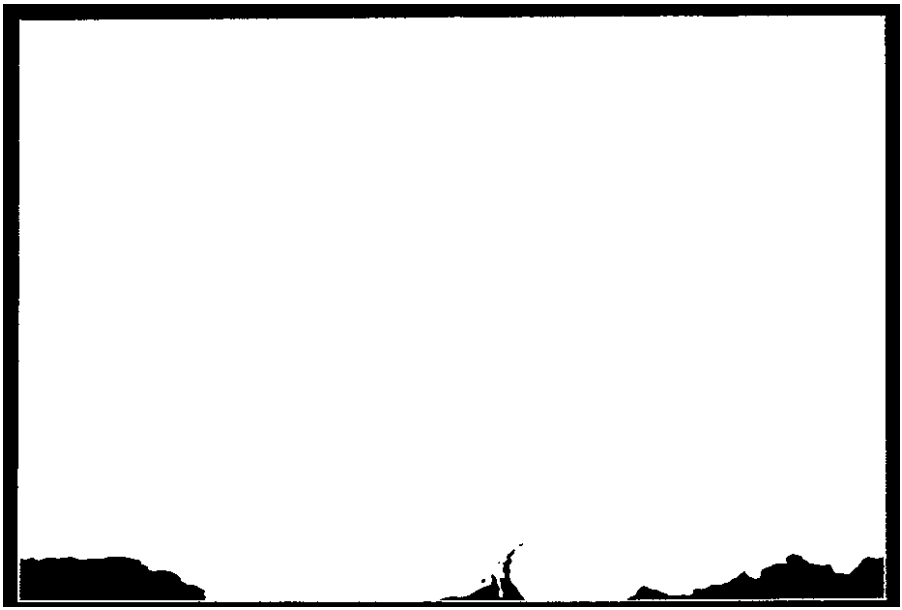
cañón disparadas desde la montaña de

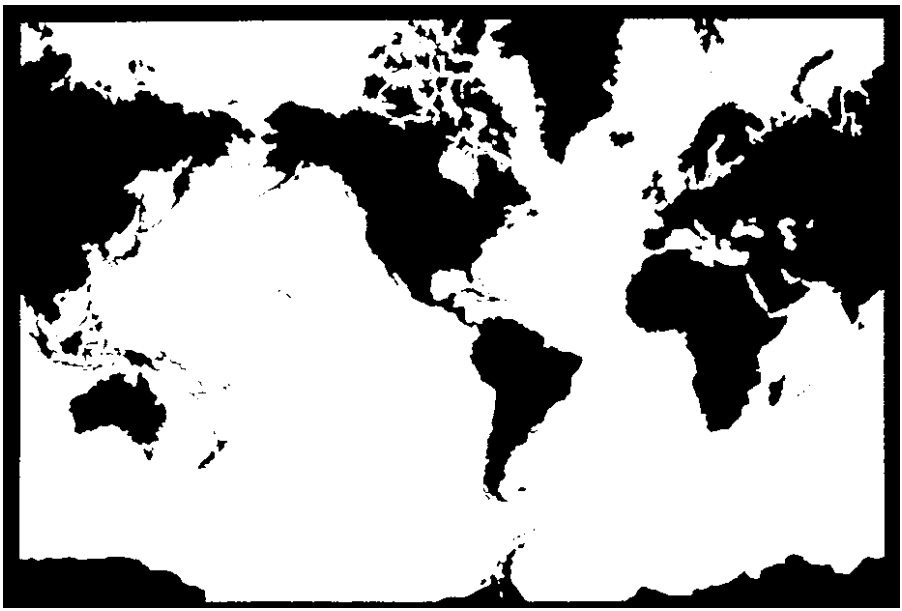
centro de la Tierra.

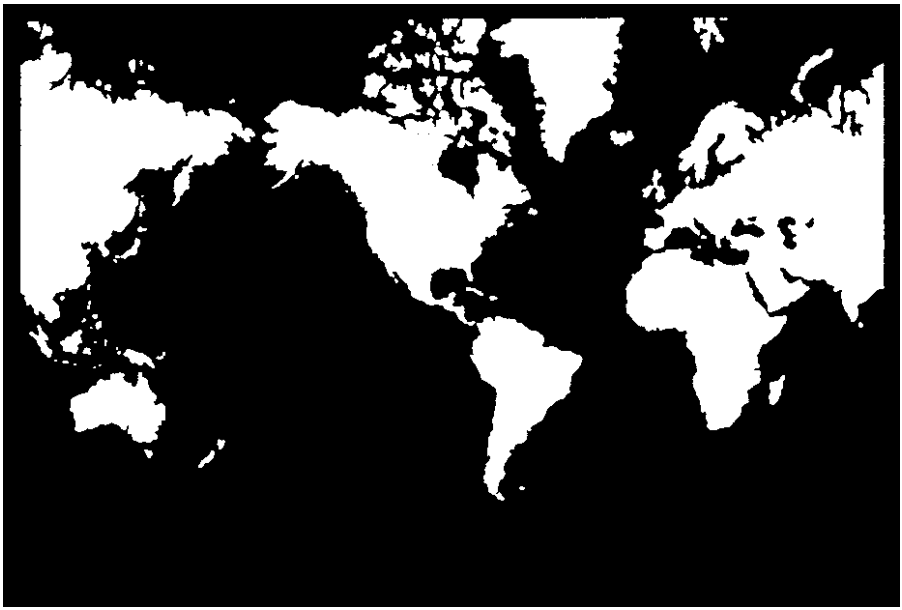
Newton. Para todas esas elipses el cen-

tro de la Tierra es un foco. A medida que aumenta la velocidad de salida, las elipses son menos excéntricas (casi más circulares); cuando la velocidad de salida alcanza 8 km/s, la elipse se convierte en círculo y no interseca la superficie de la Tierra. La bala de cañón viaja en una órbita circular. A mayores velocidades de salida, las balas de cañón en órbita trazan las conocidas elipses externas.









C A PÍ T U LO 10 M OV I M I EN TO D E PROY EC T I L ES Y SAT ÉL I T ES

195

P U N T O D E C O N T R O L

B

En el dibujo se muestra la trayectoria orbital de un

satélite. ¿En cuál de las posiciones marcadas, de

A

C

la A a la D, el satélite tiene la mayor rapidez? ¿La

D

menor rapidez?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

El satélite tiene su mayor rapidez cuando pasa por la posición A y tiene su menor rapidez en la posición C. Después de pasar C gana rapidez conforme cae de vuelta hacia A para repetir su ciclo.

MONITORIZACIÓN MUNDIAL VÍA SATÉLITE

Los satélites ayudan a monitorizar el planeta. La Figura Un ejemplo asombroso pero común de tal monitorización fue la A muestra la trayectoria trazada en un periodo por un

observación en todo el mundo durante 3 años de la distribución del

satélite en órbita circular lanzado en una dirección hacia

fitoplancton marino (Figura C). Tal información tan extensa habría

el noreste desde Cabo Cañaveral, Florida. La trayectoria es

sido imposible de adquirir antes de la llegada de los satélites.

curva sólo porque el mapa es plano. Observa que la trayectoria

cruza el ecuador dos veces en un periodo, porque ésta describe

un círculo cuyo plano atraviesa el centro de la Tierra. Observa

también que la trayectoria no termina donde comienza. Esto se

debe a que la Tierra gira bajo el satélite mientras éste la orbita.

Durante el periodo de 90 minutos, la Tierra gira 22.58, de

modo que, cuando el satélite completa una órbita, comienza su nuevo barrido muchos kilómetros al oeste (aproximadamente 2,500 km en el ecuador). Esto es muy ventajoso para los satélites que monitorizan la Tierra. La Figura B muestra el área monitorizada durante 10 días mediante barridos sucesivos para un satélite típico.

F I G U R A B

Patrón de barrido típico de un satélite durante el periodo de una semana.

F I G U R A A

Trayectoria de un satélite típico lanzado en una dirección

F I G U R A C

hacia el noreste desde Cabo Cañaveral. Puesto que la Tierra

Producción de fitoplancton en los océanos de la Tierra durante

gira mientras el satélite está en órbita, cada barrido pasa por un periodo de 3 años. Magenta y amarillo indican las mayores arriba unos 2,100 km más hacia el oeste a la latitud de Cabo concentraciones, mientras que azul indica concentraciones Cañaveral.

moderadamente altas.

10.5 *Leyes de movimiento planetario de Kepler*

La ley de gravitación de Newton estuvo precedida por tres importantes descubrimientos acerca del movimiento planetario que hizo el astrónomo alemán Johannes Kepler, quien comenzó como asistente del afamado astrónomo danés Tycho Brahe. Brahe dirigió el primer gran observatorio del mundo, en Dinamarca, justo antes del advenimiento del telescopio. Con

enormes instrumentos de latón parecidos a compases, llamados cuadrantes, Brahe midió las posiciones de los planetas durante 20 años con tanta exactitud que sus mediciones todavía son válidas en la actualidad. Brahe confió sus datos a Kepler. Después de la muerte de Brahe, Kepler convirtió las mediciones de Brahe en valores que obtendría un observador estacionario afuera del sistema solar. La Tycho Brahe (1546-1601)

expectativa de Kepler de que los planetas se movían en círculos perfectos alrededor del Sol fue echada por tierra después de años de esfuerzo. Descubrió que las trayectorias eran elipses. Ésta es la primera ley del movimiento planetario de Kepler: ***La trayectoria de todos los planetas alrededor del Sol es una elipse y el Sol es uno de sus focos.***

Kepler también descubrió que los planetas no giran alrededor del Sol con una rapidez uniforme, sino que se mueven más rápido cuando están más cerca del Sol y más lento cuando están más lejos del Sol. Lo hacen de tal forma que una línea o rayo imaginario que une al Sol y al planeta barre áreas iguales de espacio en tiempos iguales. El área triangular barrida durante un mes cuando un planeta orbita lejos del Sol ("triángulo" ASB de la Figura 10.29) es igual al área triangular barrida durante un mes cuando el planeta orbita más cerca del Sol ("triángulo" CSD de la Figura 10.29). Ésta Johannes Kepler (1571-1630)

es la segunda ley de Kepler:

A

B

La línea entre el Sol y cualquier planeta barre áreas iguales de espacio en iguales intervalos de tiempo.

Kepler fue el primero en acuñar la palabra satélite. No tenía una idea clara de por qué los planetas se movían como él lo descubrió. Al carecer de un modelo concep-S

tual, no pudo ver que un satélite era tan sólo un proyectil bajo la influencia de una C

fuerza gravitacional dirigida hacia el cuerpo que el satélite orbita. Tú sabes que, si lanzas una roca hacia arriba, irá más lento mientras más alto se eleve porque se mueD

ve contra la gravedad. Y sabes que, cuando la roca regresa, se mueve con la gravedad ***F I G U R A 1 0 . 2 9***

y su rapidez aumenta. Kepler no vio que un satélite se comportaba como un pro-Áreas iguales barridas en intervalos de

yectil, aunque se dio cuenta de que un planeta frenaba al alejarse del Sol y adquiría tiempo iguales.

rapidez cuando se aproximaba al Sol. Un satélite, ya sea un planeta que orbita al Sol o uno de los satélites actuales que orbitan la Tierra, se mueve más lento contra el campo gravitacional y más rápido a favor del campo. Kepler no vio esta simplicidad y entonces fabricó complejos sistemas de figuras geométricas para dar sentido a sus descubrimientos. Dichos sistemas resultaron ser falsos.

Después de buscar durante 10 años, mediante ensayo y error, una relación entre el tiempo que tarda un planeta en orbitar el Sol y su distancia del Sol, Kepler descubrió Al conocer el tamaño y el periodo

una tercera ley. Por los datos de Brahe, Kepler descubrió que el periodo de cualquier de la órbita de la Tierra, puedes

planeta (T) se relaciona con su distancia promedio del Sol (r). La tercera ley es: usar la tercera ley de Kepler y el

periodo orbital de un planeta para

calcular su distancia promedio del

***El cuadrado del periodo orbital de un planeta es directamente proporcional al** Sol.*

cubo de la distancia promedio del planeta del Sol (T 2 ~ r 3 para todos los planetas).

Esto significa que la razón T 2/ r 3 es la misma para todos los planetas. De modo que, si se conoce el periodo de un planeta, su distancia radial orbital promedio se calcula con facilidad (y viceversa).

C A PÍ T U LO 10 M OV I M I EN TO D E PROY EC T I L ES Y SAT ÉL I T ES

197

CÓMO ENCONTRAR TU CAMINO

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus el tiempo cuando la recibió. La diferencia de tiempo indica al siglas en inglés) es un sistema de navegación basado en

receptor GPS la distancia del satélite. Después, con mediciones

satélites que consta de 24 satélites colocados en órbita

de distancia de algunos satélites más, el receptor GPS determina

por el Departamento de Defensa estadounidense. Originalmente

la posición del usuario y la muestra en el mapa electrónico de la

dirigido a aplicaciones militares, en la década de 1980 el sistema se
unidad.

puso a disposición de usos civiles. El GPS funciona en cualquier

Un receptor GPS debe acoplarse a la señal de al menos tres

condición climática, en cualquier parte del mundo, las 24 horas

satélites para calcular una posición bidimensional (latitud y

del día. Los satélites GPS dan vuelta a la Tierra dos veces al día

longitud) y rastrear el movimiento. Con cuatro o más satélites a la

en órbitas muy precisas a unos 20,000 km de altura, mucho más

vista, el receptor puede determinar la posición en tres dimensiones

alto que la Estación Espacial Internacional y un poco más de la

del usuario (latitud, longitud y altitud). Una vez determinada

mitad de alto que los satélites geoestacionarios. Los satélites GPS

la posición del usuario, la unidad GPS puede calcular otra

transmiten información de las señales a los dispositivos GPS

información, como rapidez, dirección, vía, distancia del viaje,

de la Tierra, que "triangulan" la ubicación exacta del usuario al

distancia al destino, horas de la salida y la puesta de Sol, y más.

comparar el tiempo cuando un satélite transmitió una señal con

Es interesante observar que Kepler estaba familiarizado con las ideas de

Galileo acerca de la inercia y el movimiento acelerado, pero no consiguió aplicarlas a su propio trabajo. Al igual que Aristóteles, pensó que la fuerza sobre un cuerpo en movimiento En 2009, 400 años después de que

estaría en la misma dirección que el movimiento del cuerpo. Kepler nunca percibió el Galileo inventara el telescopio,

concepto de inercia. Galileo, por otra parte, nunca apreció la obra de Kepler y man-Estados Unidos lanzó un telescopio

orbital llamado Kepler, específica-

tuvo su convicción de que los planetas se movían en círculos.2 Para comprender mejor mente para ver planetas parecidos

el movimiento planetario se necesitaba de alguien que integrara los hallazgos de estos a la Tierra ocultos por la luz de sus

dos grandes científicos.3 El resto es historia, pues esta tarea recayó en Isaac Newton.

soles.

***10.6** Conservación de energía*

y movimiento de satélites

Recuerda, del capítulo 7, que un objeto en movimiento posee energía cinética (EC) debida a su movimiento. Un objeto arriba de la superficie de la Tierra tiene energía potencial (EP) en virtud de su posición. En todas las partes de su órbita, un satélite tiene tanto EC como EP. La suma de EC y EP es una constante a todo lo largo de la órbita. El caso más simple es el de un satélite en órbita circular.

En una órbita circular, la distancia entre el

EP + EC

F I G U R A 1 0 . 3 0

satélite y el centro del cuerpo que lo atrae no

La fuerza de gravedad sobre el satélite

cambia, lo que significa que la EP del satélite

F

siempre es hacia el centro del cuerpo que

es la misma en toda su órbita. Entonces, por la

orbita. Para un satélite en órbita circular,

conservación de la energía, la EC también debe

F

F

EP + EC

EP + EC

no hay ningún componente de fuerza

ser constante. De modo que un satélite en órbi-

que actúe a lo largo de la dirección de

ta circular viaja con EP, EC y rapidez invaria-

movimiento. La rapidez, y por tanto la

F

EC, no cambian.

bles (Figura 10.30).

EP + EC

2No es fácil observar las cosas que conocemos a través de las nuevas ideas de otros. Uno tiende a ver sólo lo que aprendió a ver o quiere ver. Galileo señaló que muchos de sus colegas no podían, o no querían, ver las lunas de Júpiter cuando entornaron sus ojos con escepticismo a través de sus telescopios. Los telescopios de Galileo fueron una bendición para la astronomía, pero más importante que un instrumento perfeccionado para ver con más claridad las cosas era una nueva forma de comprender lo que se veía. ¿Esto todavía es válido en la actualidad?

3Tal vez tu instructor te muestre que la tercera ley de Kepler resulta cuando la fórmula del inverso al cuadrado de Newton para la fuerza gravitacional se iguala con la fuerza centrípeta, y cómo es igual a una constante que sólo depende de G y M, la masa del cuerpo en torno al cual

ocurre la órbita. ¡Intrigante asunto!

En una órbita elíptica, la situación es diferente. Tanto la rapidez como la distancia EC + EP

varían. La EP es mayor cuando el satélite está más alejado (en su apogeo) y menor cuando el satélite está más cerca (en su perigeo). Observa que la EC será mínima cuando la EP sea máxima, y la EC será máxima cuando la EP sea mínima. En cada punto de la órbita, la suma de EC y EP es la misma (Figura 10.31).

EC + EP

EC + EP

En todos los puntos a lo largo de la órbita elíptica, excepto en el apogeo y

el perigeo, existe una componente de fuerza gravitacional paralela a la dirección de movimiento del satélite. Este componente de fuerza cambia la rapidez del satélite. O es posible decir

+ EP

que (esta componente de fuerza) (distancia recorrida) EC. De cualquier forma, EC

cuando el satélite gana altitud y se mueve contra este componente, su rapidez y EC

F I G U R A 1 0 . 3 1

disminuyen. La disminución continúa hacia el apogeo. Una vez pasado el apogeo, el La suma de EC y EP para un satélite es

satélite se mueve en la misma dirección que la componente, y la rapidez y EC aumen-una constante en todos los puntos a lo

tan. El aumento continúa hasta que el satélite pasa el perigeo y el ciclo se repite.

largo de su órbita.

P U N T O D E C O N T R O L

1. En el dibujo se muestra la trayectoria orbital de

C

un satélite. ¿En cuál posición marcada, de la A a la

D

D, el satélite tiene mayor EC? ¿Mayor EP? ¿Mayor

energía total?

2. ¿Por qué la fuerza de gravedad cambia la rapidez

de un satélite cuando está en una órbita elíptica

B

pero no cuando está en una órbita circular?

Esta componente de

fuerza realiza trabajo

sobre el satélite

A

F

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *La EC es máxima en el perigeo A; la EP es máxima en el apogeo C, y la energía total es la misma en todas partes de la órbita.*

2. *En una órbita circular, la fuerza gravitacional siempre es perpendicular a la tra-F I G U R A 1 0 . 3 2*

yectoria orbital. Sin componente de fuerza gravitacional a lo largo de la trayec-En una órbita elíptica, una componente

toria, sólo cambia la dirección de movimiento, no la rapidez. Sin embargo, en de fuerza existe a lo largo de la direc-órbita elíptica, el satélite se mueve en direcciones que no son perpendiculares a la ción de movimiento del satélite. Este

fuerza de gravedad. Entonces las componentes de fuerza sí existen a lo largo de componente cambia la rapidez y, por

la trayectoria, lo que cambia la rapidez del satélite. Una componente de fuerza a tanto, la EC. (La componente perpendi-lo largo de (paralela a) la dirección de movimiento del satélite hace trabajo para cular sólo cambia la dirección.)

cambiar su EC.

10.7 *Rapidez de escape*

Se sabe que una bala de cañón disparada horizontalmente a 8 km/s desde la montaña de Newton se pondría en órbita. ¿Pero qué ocurriría si la bala se disparara con la misma rapidez verticalmente? Se elevaría hasta cierta altura máxima, invertiría su dirección y luego caería de vuelta a la Tierra. Entonces el viejo dicho "todo lo que sube tiene que bajar" sería cierto, tan seguramente como que una piedra lanzada hacia arriba regresará por la gravedad (a menos, como verás, que su rapidez sea suficientemente grande).

¿No le habría encantado a Newton

ver el movimiento de satélites en

En la era actual de vuelos espaciales, es más exacto decir "todo lo que sube puede términos de energía, un concepto

bajar", pues existe una rapidez inicial crítica que permite que un proyectil supere que llegó mucho después?

la gravedad y escape de la Tierra. Esta rapidez crítica se llama ***rapidez de escape*** *o, si se involucra la dirección, velocidad de escape. Desde la superficie de la Tierra, la*

rapidez de escape es de 11.2 km/s. Si lanzas un proyectil a una rapidez mayor, dejará la Tierra y viajará cada vez más lento, pero nunca se detendrá debido a la gravedad de la Tierra.4 Se puede entender la magnitud de esta rapidez desde un punto de vista a

d

energético.

b c

¿Cuánto trabajo se necesitaría para levantar una carga contra la fuerza de gravedad de la Tierra hasta una distancia muy, muy lejana ("infinitamente lejana")? Puedes pensar que el cambio en EP sería infinito porque la distancia es infinita. Pero la gravedad disminuye con la distancia por la ley del inverso al cuadrado. La fuerza de gravedad sobre la carga sería intensa sólo cerca de la Tierra. La mayor parte del trabajo realizado al lanzar un cohete ocurre ***F I G U R A 1 0 . 3 3***

a unos 10,000 km de la Tierra. Resulta que el cambio de EP de un cuerpo de 1 kg movido (a) Si Superman lanza una bola a 8 km/s desde la superficie de la Tierra hasta una distancia infinita es 63 mil ones de joules (63 MJ). horizontalmente desde la cima de una De modo que para levantar una carga infinitamente lejos de la superficie de la Tierra se montaña tan alta que está justo arriba de necesitan al menos 63 MJ de energía por kilogramo de carga. En la práctica, esta energía la resistencia del aire, entonces aproxi-se suma a lo largo de una distancia a medida que la carga se levanta de la superficie de la madamente 90 minutos después puede darse la vuelta y atraparla (si desprecia

Tierra. Pero uno puede imaginar que se lanza la carga como una bala de cañón, con sufi- la rotación de la Tierra). (b) Lanzada un ciente rapidez inicial que la ponga a viajar una gran distancia. Resulta que, en ausencia de poco más rápido, la bola adoptará una resistencia aerodinámica, la rapidez de lanzamiento de la carga, sin importar su masa, debe órbita elíptica y regresará en un tiempo ser al menos de 11.2 km/s. Ésta es la llamada rapidez de escape de la superficie de la Tierra.5 ligeramente más largo. (c) Lanzada más Si a una carga se le da más energía que 63 MJ por kilogramo conforme abandona rápido que 11.2 km/s, escapará de la la Tierra o, para el lanzamiento de una hipotética bala de cañón, más rapidez que Tierra. (d) Lanzada a más de 42.5 km/s, 11.2 km/s, entonces, si desprecias la resistencia aerodinámica, la carga escapará de la escapará del sistema solar.

Tierra, para nunca regresar. A medida que continúa avanzando hacia el exterior, su EP aumenta y su EC disminuye. Su rapidez se vuelve cada vez menor, aunque nunca se reduce a cero. La carga supera la gravedad de la Tierra. Escapa.

En la Tabla 10.1 se presentan las rapideces de escape de varios cuerpos en el sistema solar. Observa que la rapidez de escape de la superficie del Sol es 618 km/s.

Incluso a 150,000,000 km de distancia del Sol (distancia de la Tierra), la rapidez de ***T A B L A 1 0 . 1***

R A P I DEC ES DE ESC A PE EN L A SU PE RFI C I E DE CUE R P OS

DEL S IST EM A SOL A R

Rapidez de

Cuerpo

Masa

Radio

escape

astronómico

(masas terrestres)

(radios terrestres)

(km/s)

Sol

333,000

109

618

La mente que abarca al Universo

Sol (a distancia de la órbita

23,500

42.2

es tan maravillosa como el Uni-

verso que abarca la mente.

terrestre)

Júpiter

318

11

59.5

Saturno

95.2

9.1

35.5

Neptuno

17.1

3.9

23.5

Urano

14.5

4.0

21.3

Tierra

1.00

1.00

11.2

Venus

0.82

0.95

10.4

Marte

0.11

0.53

5.0

Mercurio

0.055

0.38

4.3

Luna

0.0123

0.27

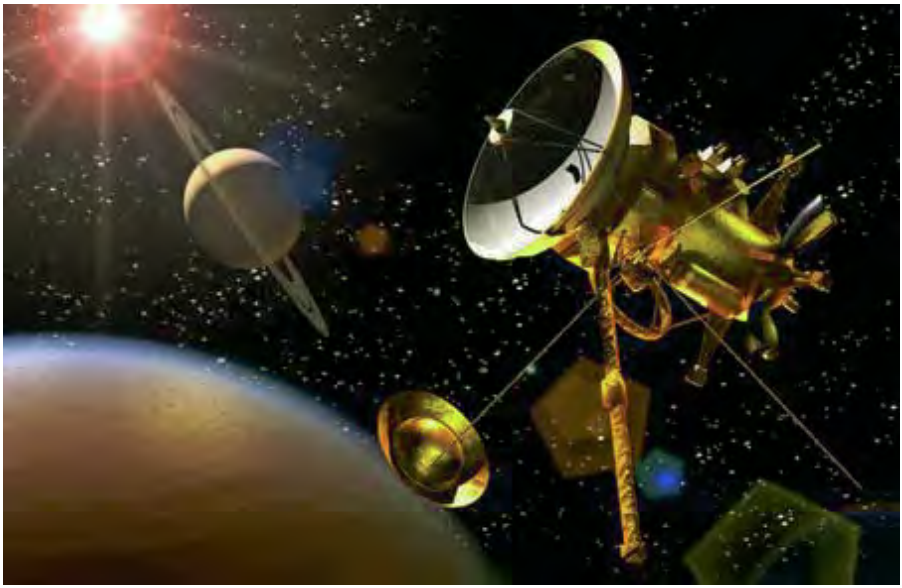
2.4

4La rapidez de escape de cualquier planeta o cualquier cuerpo está dada por v = "2 MG

d , donde G es la constan-

te de gravitación universal, M es la masa del cuerpo que atrae y d es la distancia desde su centro. (En la superficie del cuerpo, d simplemente es el radio del cuerpo.) Para una comprensión un poco más matemática, compara esta fórmula con la de la rapidez orbital en la nota al pie 1 algunas páginas atrás.

5Es muy interesante que esto bien puede llamarse la máxima rapidez de caída. Sin embargo, la rapidez de cualquier objeto lejos de la Tierra, liberado desde el reposo y que se le permita caer hacia la Tierra sólo bajo la influencia de la gravedad de la Tierra, no superaría 11.2 km/s. (Con fricción del aire, sería menos.)



escape para liberarse de la influencia del Sol es 42.5 km/s, mucho mayor que la rapidez de escape de la Tierra. Un objeto proyectado desde la Tierra con una rapidez ma yor que 11.2 km/s pero menor que 42.5 km/s escapará de la Tierra mas no del Sol. En lugar de alejarse para siempre, ocu-F I G U R A 1 0 . 3 4

La histórica sonda Pioneer 10, lanzada

pará una órbita alrededor del Sol.

desde la Tierra en 1972, pasó al planeta

La sonda Pioneer 10 , que ahora

más exterior en 1983 y ahora vaga por

está mucho más lejos que los gran-

los confines exteriores del sistema solar.

des planetas, fue lanzada desde la

Tierra en 1972 con una rapidez de

sólo 15 km/s. El escape se logró al

dirigir la sonda para pasar justo de-

trás del gigante Júpiter. Fue barrida

por el gran campo gravitacional

de Júpiter y adquirió rapidez en el

proceso, similar al aumento de ra-

pidez de una pelota de béisbol que

encuentra un bate entrante (pero

sin contacto físico). Su rapidez de partida de Júpiter aumentó lo suficiente para superar la rapidez de escape del Sol a la distancia de Júpiter. La Pioneer 10 está en los confines exteriores del sistema solar y pasó las órbitas de Neptuno y Plutón en 1983. A menos que choque con otro cuerpo, vagará indefinidamente por el espacio interestelar. Como una botella lanzada al océano con una nota en su interior, la Pioneer 10 contiene información acerca de la Tierra que puede ser de interés para los extraterrestres, con la esperanza de que un día sea "arrastrada" y se encuentre en alguna "playa" distante.

Es importante señalar que la rapidez de escape de un cuerpo es la rapidez inicial dada por un breve empu-F I G U R A 1 0 . 3 5

je, después del cual no hay

La nave espacial europeo-estadouniden-

fuerza que auxilie al movi-

se Cassini transmite a la Tierra imágenes

miento. Uno podría escapar

de acercamiento de Saturno y su luna

de la Tierra a cualquier rapi-

gigante, Titán. También mide la tempe-

dez sostenida mayor a cero,

ratura superficial, los campos magnéti-

cos y el tamaño, rapidez y trayectorias

si se da el tiempo suficiente.

de pequeñas partículas espaciales

Por ejemplo, supón que un

circundantes.

cohete se lanza hacia un des-

tino como la Luna. Si los

motores del cohete se agotan

cuando todavía esté cerca de

la Tierra, el cohete necesita

una rapidez mínima de 11.2

km/s. Pero si los motores del

cohete pueden sostenerse durante largos periodos de tiempo, el cohete podría llegar a la Luna sin jamás lograr 11.2 km/s.

Es interesante observar que la exactitud con la que un cohete no tripulado llega a su Así como los planetas caen alre-destino no se logra con permanecer en una trayectoria prevista de antemano o regresar-dedor del Sol, las estrellas caen

lo a dicha trayectoria si el cohete sale de curso. No se hace ningún intento por regresar alrededor de los centros de las galaxias. Las que no tienen suficiente

el cohete a su trayectoria original. En vez de ello, el centro de control en funciones rapidez tangencial son jaladas y

pregunta: "¿Dónde está ahora y cuál es su velocidad? ¿Cuál es la mejor forma de llegar engullidas por el núcleo galáctico,

a su destino, dada su situación actual?" Con la ayuda de computadoras de gran rapidez, que es por lo general un agujero

las respuestas a estas preguntas permiten encontrar una nueva trayectoria. Entonces, negro.

propulsores correctivos dirigen el cohete hacia esta nueva trayectoria. Este proceso se repite una y otra vez todo el camino hasta la meta.6

6¿Hay una lección que aprender aquí? Imagina que descubres que estás fuera de curso. Puedes, como el cohete, encontrar más provechoso seguir un curso que te conduzca a tu meta como mejor se ajuste de acuerdo con tu posición y circunstancias actuales, en lugar de tratar de regresar al curso que trazaste desde una posición anterior y, acaso, bajo circunstancias diferentes.

C A PÍ T U LO 10 R E V ISI Ó N

201

R E S U M E N D E T É R M I N O S *(C O N O C I M I E N T O)*
Proyectil. *Cualquier objeto que se mueve por el aire o el espacio* ***Leyes de Kepler.*** *Ley 1: La trayectoria de cada planeta*

bajo la influencia de la gravedad.

alrededor del Sol es una elipse y el Sol es uno de sus focos.

Parábola. *Trayectoria curva seguida por un proyectil sólo bajo Ley 2: La línea entre el Sol y cualquier planeta barre áreas*

la influencia de gravedad constante.

iguales de espacio en intervalos de tiempo iguales.

Satélite. *Proyectil o pequeño cuerpo celeste que orbita un*

Ley 3: El cuadrado del periodo orbital de un planeta es

cuerpo celeste más grande.

directamente proporcional al cubo de la distancia promedio

Elipse. *Trayectoria oval que sigue un satélite. La suma de las del planeta del Sol (T 2 ~ r 3 para todos los planetas).*

distancias entre cualquier punto sobre la trayectoria y dos

Rapidez de escape. *Rapidez que debe alcanzar un proyectil, puntos llamados focos es una constante. Cuando los focos sonda espacial u objeto similar para escapar a la influencia están juntos en un punto, la elipse es un círculo. A medida gravitacional de la Tierra o de otro cuerpo celeste al cual esté que los focos se separan, la elipse se vuelve más "excéntrica". atraído.*

PREGUNTAS CONCEPTUALES *(COMPRENSIÓN)*

10.1 Movimiento de proyectiles

13. ¿Por qué la fuerza de gravedad no cambia la rapidez de un

1. ¿Qué es exactamente un proyectil?

satélite en órbita circular?

2. ¿Por qué la componente vertical de velocidad de

14. ¿Cuánto tiempo tarda una revolución completa de un

un proyectil cambia con el tiempo, mientras que la

satélite en órbita cercana alrededor de la Tierra?

componente horizontal de velocidad no cambia?

15. Para órbitas de mayor altitud, ¿el periodo es más largo o

3. Una piedra se lanza hacia arriba en un ángulo. ¿Qué ocurre

más corto?

con la componente horizontal de su velocidad a medida que

10.4 Órbitas elípticas

se eleva? ¿A medida que cae?

16. ¿Por qué la fuerza de gravedad cambia la rapidez de un

4. Una piedra se lanza hacia arriba en un ángulo. ¿Qué

satélite en una órbita elíptica?

ocurre con la componente vertical de su velocidad a

medida que se eleva? ¿A medida que cae?

17. ¿En qué parte de una órbita elíptica un satélite terrestre

tiene mayor rapidez? ¿Menor rapidez?

5. Un proyectil cae por debajo de la trayectoria en línea recta

que seguiría si no hubiera gravedad. ¿Cuántos metros cae

10.5 Leyes de movimiento planetario de Kepler

bajo esta línea si ha viajado durante 1 s? ¿Durante 2 s?

18. ¿Quién recopiló los datos que demostraron que los

6. ¿Tus respuestas a la pregunta anterior dependen del

planetas viajan en trayectorias elípticas alrededor del Sol?

ángulo al que se lance el proyectil?

¿Quién descubrió las órbitas elípticas? ¿Quién las explicó?

7. Un proyectil se lanza hacia arriba con un ángulo de 708

19. ¿Qué descubrió Kepler acerca de los periodos de los

desde la horizontal y golpea el suelo a cierta distancia a

planetas y sus distancias del Sol?

lo lejos. ¿Con qué otro ángulo de lanzamiento, y con la

20. ¿Cuál fue la dirección de la fuerza sobre un planeta en el

misma rapidez, este proyectil aterrizaría igual de lejos?

razonamiento de Kepler? ¿En el razonamiento de Newton?

8. Un proyectil se lanza verticalmente a 100 m/s. Si puedes

despreciar la resistencia del aire, ¿con qué rapidez regresará a

10.6 Conservación de energía y movimiento de

su nivel inicial?

satélites

21. ¿Por qué la energía cinética es constante para un satélite

10.2 Proyectiles con movimiento rápido: satélites

en una órbita circular mas no para un satélite en una

9. ¿Cómo un proyectil puede "caer alrededor de la Tierra"?

órbita elíptica?

10. ¿Cómo se relaciona la curvatura de la Tierra con la

22. ¿La suma de las energías cinética y potencial es una

rapidez necesaria para que un proyectil orbite la Tierra?

constante para los satélites en órbitas circulares, en

11. ¿Por qué es importante que el proyectil de la pregunta

órbitas elípticas o en ambas?

anterior esté por arriba de la atmósfera de la Tierra?

10.7 Rapidez de escape

10.3 Órbitas satelitales circulares

23. La rapidez de escape de la Tierra es 11.2 km/s. ¿Es posible

12. ¿Por qué la fuerza de gravedad no cambia la rapidez de

escapar de la Tierra a la mitad de esta rapidez? ¿A un

una bola de boliche cuando rueda por una bolera?

cuarto de esta rapidez? Si es así, ¿cómo?

P I E N S A Y R E A L I Z A *(A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 24. Con una vara y cuerdas, fabrica una "vara de trayectoria"*

tu cubeta y el movimiento de los satélites: que

como la que se muestra en la página 187.

los satélites en órbita caen continuamente hacia

25. Con tus amigos, haz girar una cubeta de agua en un círculo

la Tierra, pero no con suficiente rapidez vertical

vertical suficientemente rápido como para que el agua no

como para acercarse más a la Tierra curva que

se derrame. Mientras lo hacen, el agua de la cubeta está

está debajo. ¡Recuerda a tus amigos que la física

cayendo, pero con menos rapidez de la que le proporcionas

tiene que ver con encontrar las conexiones en la

a la cubeta. Indica cuál es la relación entre el balanceo de

naturaleza!

P I E N S A Y R E S U E L V E *(A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 26. Una bola se lanza horizontalmente desde un risco con*

31. En un punto particular de su órbita, un satélite en una

una rapidez de 10 m/s. Predices que su rapidez 1 s

órbita elíptica tiene una energía potencial gravitacional

después será un poco mayor que 14 m/s. Tu amigo dice

de 5,000 MJ con respecto a la superficie de la Tierra

que será 10 m/s. Demuestra quién tiene la razón.

y una energía cinética de 4,500 MJ. Más tarde en su

27. Estás en un avión que vuela horizontalmente con una

órbita, la energía potencial del satélite es de 6,000 MJ.

rapidez de 1,000 km/h (280 m/s) cuando un motor se

¿Cuál es su energía cinética en dicho punto?

cae. Desprecia la resistencia del aire y supón que el motor

32. Cierto satélite tiene una energía cinética de 8 mil

tarda 30 s en golpear el suelo.

millones de joules en el perigeo (el punto más cercano

a.

Demuestra que el avión está a 4.5 km de altura.

a la Tierra) y 5 mil millones de joules en el apogeo (el

b.

Demuestra que la distancia horizontal que recorre el

punto más alejado de la Tierra). Conforme el satélite

motor del avión durante su caída es de 8,400 m.

viaja del apogeo al perigeo, ¿cuánto trabajo hace sobre él

c.

Si de algún modo el avión sigue volando como si nada

la fuerza gravitacional? ¿Su energía potencial aumenta o

ocurriera, ¿dónde está el motor en relación con el

disminuye durante este tiempo, y en cuánto?

avión en el momento en que el motor golpea el suelo?

33. Calcula el tiempo en el aire ("tiempo de vuelo") de una

28. Bob Diana, en un coto de caza, dispara su rifle hacia

persona que se mueve horizontalmente 3 m durante un salto

un blanco a 200 metros de distancia. La bala se mueve

de 1.25 m de alto. ¿Cuál es el tiempo en el aire cuando la

horizontalmente desde el cañón del rifle con una rapidez

persona se mueve 6 m horizontalmente durante este salto?

de 400 m/s.

34. Una pelota de tenis que tiene un movimiento horizontal

a.

¿Cuánto cae la bala desde una trayectoria horizontal

cuando libra la red a una altura y por encima de la superficie para cuando alcanza el blanco?

de la cancha. Para aterrizar dentro de la cancha de tenis, la

pelota no debe moverse muy rápido.

b.

Para golpear una diana, ¿por qué Bob ajusta su mirilla

de modo que el cañón apunta un poco arriba cuando

a.

Para permanecer dentro del límite de la cancha, a una

dispara al blanco?

distancia horizontal d de la parte baja de la red, demues-

tra que la rapidez máxima de la pelota sobre la red es

29. Una pelota de béisbol disparada con una velocidad

inicial de 141 m/s a un ángulo de 458 sigue una trayectoria

d

parabólica y golpea un globo en lo más alto de su

$v = 2y$

trayectoria. Desprecia la resistencia del aire y demuestra

que la pelota golpea al globo con una rapidez de 100 m/s.

g

30. Los estudiantes en el laboratorio (Figura 10.5) miden la

b. Supón que la altura de la red es de 1.00 m y que el límite

rapidez de una bola de acero en 8.0 m/s cuando se lanza

de la cancha está a 12.0 m desde la parte baja de la red.

horizontalmente desde una mesa de 1.0 m de alto. Su

Usa g 10 m/s2 y demuestra que la rapidez máxima de

objetivo es colocar una lata de café de 20 cm de alto en

la pelota que se mueve horizontalmente para librar la red

el suelo para atrapar la bola. Demuestra que le atinan al

es de aproximadamente 27 m/s (alrededor de 60 mi/h).

blanco cuando la lata se coloca a 3.2 m de la base de

c. ¿La masa de la pelota representa alguna diferencia?

la mesa.

Defiende tu respuesta.

***P I E N S A Y C L A S I F I C A** (A N Á L I S I S)*

35. Una bola se lanza hacia arriba con las velocidades y

36. Una bola se lanza desde el borde de un risco con la

ángulos que se muestran. De mayor a menor, clasifícales

misma rapidez pero con diferentes ángulos, como se

por sus:

muestra. De mayor a menor, clasifica:

/s

10 m/s

20 m

37°

10 m/s

10 m/s

53°

45°

30°

A

B

C

D

a. componentes verticales de velocidad.

A

B

C

b. componentes horizontales de velocidad.

c.

aceleraciones cuando llegan a lo alto de sus

a.

las EP iniciales de las bolas en relación con el suelo

trayectorias.

bajo ellas.

b. las EC iniciales de las bolas cuando se lanzan.

c. las EC de las bolas cuando golpean el suelo bajo ellas.

d. los tiempos de vuelo mientras están en el aire.

37. Las líneas punteadas muestran tres órbitas circulares

38. Se indican las posiciones de un satélite en una órbita

alrededor de la Tierra. Clasifica las siguientes cantidades

elíptica. Clasifica estas cantidades de mayor a menor:

de mayor a menor:

D

A

B

C

C

B

a. Su rapidez orbital.

b. Su tiempo para orbitar la Tierra.

A

a. Fuerza gravitacional

e. EP

b. Rapidez

f. Energía total (EC + EP)

c. Cantidad de movimiento g. Aceleración

d. EC

***P I E N S A Y E X P L I C A** (S Í N T E S I S)*

39. En los clavados sincronizados, los clavadistas permanecen en
clara? ¿Cuál será la trayectoria vista por ti, que miras hacia
el aire durante el mismo tiempo. Sin resistencia aerodinámi-
abajo desde el avión? ¿Dónde golpeará el suelo el paquete, en
ca, caerían juntos. Pero la resistencia aerodinámica es consi-
relación contigo en el avión? ¿Dónde golpeará en el caso más
derable y los clavadistas pueden diferir mucho en tamaño y
realista en el que la resistencia del aire afecte la caída?
peso, así que ¿cómo permanecen juntos en la caída?
45. Fragmentos de fuegos artificiales iluminan hermosamente
40. Supón que ruedas una bola y sale de la mesa. ¿El tiempo
el cielo nocturno. (a) ¿Qué trayectoria específica traza
para golpear el suelo dependerá de la rapidez de la bola?
de manera ideal cada fragmento? (b) ¿Qué trayectorias
(¿Una bola rápida tardará más tiempo en golpear el suelo?)
trazarían los fragmentos en una región sin gravedad?
Defiende tu respuesta.
41. Supón que ruedas una bola y sale de una mesa. Comparada
con una que rueda lentamente, ¿una bola que se mueve más
rápido golpeará el suelo con mayor rapidez? Defiende tu
respuesta.
42. Lanzas una bola verticalmente hacia arriba en un tren
con movimiento uniforme, regresa a su lugar de partida.
46. En ausencia de resistencia del aire, ¿por qué la componente

¿Hará lo mismo si el tren acelera? Explica.

horizontal del movimiento de un proyectil no cambia, en

43. Una pesada caja cae accidentalmente de un avión que vuela

tanto que la componente vertical sí cambia?

alto justo cuando vuela directo sobre un brillante Porsche

47. Si la resistencia aerodinámica puede ignorarse, ¿en qué

rojo perfectamente bien estacionado en un lote de autos.

punto de su trayectoria una pelota de béisbol bateada

En relación con el Porsche, ¿dónde chocará la caja?

tiene su rapidez mínima? ¿Cómo se compara esto con la

componente horizontal de su velocidad en otros puntos?

48. Cuando un fusil se dispara hacia un blanco distante,

¿por qué el cañón no se alinea de modo que apunte

exactamente al blanco?

49. Dos golfistas golpean cada uno una bola con la misma

rapidez, pero uno a 608 con la horizontal y el otro a 308.

¿Cuál bola llegará más lejos? ¿Cuál golpea primero el

suelo? (Ignora la resistencia del aire.)

50. Un guardia forestal dispara a un mono que cuelga de una

rama de un árbol con un dardo tranquilizante. El guardia

apunta directamente al mono, sin darse cuenta de que el

44. Imagina que sueltas un paquete de ayuda desde un avión que

dardo seguirá una trayectoria parabólica y por ende caerá

viaja con velocidad constante, y luego supón que la resistencia

abajo del mono. Sin embargo, el mono ve el dardo salir del

del aire no afecta al paquete que cae. ¿Cuál será su trayecto-

arma y se suelta de la rama para evitar que lo alcance. ¿De

ria de caída observada por alguien en reposo sobre el suelo,

cualquier forma el dardo alcanzará al mono? ¿La velocidad

no directamente abajo sino a un lado donde hay una visión

del dardo modifica tu respuesta, si supones que es tan

grande que recorre la distancia horizontal hasta el árbol

63. La Tierra está más cerca del Sol en diciembre que en junio.

antes de golpear el suelo? Defiende tu respuesta.

¿En cuál de estos dos meses la Tierra se mueve más rápido

alrededor del Sol?

64. Si desprecias la resistencia del aire, ¿un satélite podría poner-

se en órbita en un túnel circular bajo la superficie de la Tie-

rra? Discute.

65. En el dibujo de la izquierda, una bola gana EC cuando

rueda por una colina porque la componente de peso (F)

que actúa en la dirección de movimiento realiza trabajo.

Traza la componente similar de la fuerza gravitacional que

realiza trabajo para cambiar la EC del satélite a la derecha.

51. Un proyectil se dispara recto hacia arriba a 141 m/s. ¿Qué tan

rápido se mueve en el instante en que alcanza la parte superior

F

de su trayectoria? Supón que, en vez de el o, se dispara a 458

hacia arriba. Entonces su componente horizontal de velocidad

mg

sería 100 m/s. ¿Cuál sería la rapidez del proyectil en la parte

superior de su trayectoria?

66. ¿Por qué la fuerza de gravedad realiza trabajo sobre un

52. Cuando saltas hacia arriba, tu tiempo en el aire es el

satélite cuando se mueve de una parte a otra en una

que tus pies están despegados del suelo. ¿El tiempo en

órbita elíptica, pero no hay trabajo de por medio cuando

el aire depende de tu componente vertical de velocidad

se mueve de una parte a otra en una órbita circular?

cuando saltas, de tu componente horizontal de veloci -

67. ¿Cuál es la forma de la órbita cuando la velocidad del satélite

dad o de ambos? Defiende tu respuesta.

en todas partes es perpendicular a la fuerza de gravedad?

53. El tiempo en el aire de un jugador de básquetbol que salta

68. Un satélite da vueltas a la Tierra a una distancia igual a la

una distancia vertical de 2 pies (0.6 m) es de aproxima-

distancia Tierra-Luna, ¿cuánto tardará en hacer una órbita

damente 23 segundos. ¿Cuál será el tiempo en el aire si el

completa? En otras palabras, ¿cuál sería su periodo?

jugador alcanza la misma altura mientras salta 4 pies (1.2 m)

69. ¿Un satélite puede viajar en una órbita estable en un plano que

horizontalmente?

no interseque el centro de la Tierra? Defiende tu respuesta.

54. Dado que la Luna es atraída gravitacionalmente hacia la

70. ¿Qué ocurre con el periodo de un satélite terrestre

Tierra, ¿por qué no simplemente choca con la Tierra?

cuando el satélite se pone en una órbita más alta?

55. ¿Cuáles planetas tienen un periodo de más de un año

71. Si un mecánico de vuelo suelta una caja de herramientas

terrestre, los planetas más cercanos al Sol que la Tierra, o

desde un jumbo jet que vuela muy alto, la caja choca con la

los planetas más alejados del Sol que la Tierra?

Tierra. En 2008, un astronauta en el transbordador espacial

56. Cuando un satélite viaja en una órbita circular con

en órbita accidentalmente soltó una caja de herramientas.

rapidez constante alrededor de la Tierra, ¿acelera? Si es

¿Por qué las herramientas no chocaron con la Tierra?

así, ¿en qué dirección? Si no, ¿por qué no?

Defiende tu respuesta.

57. ¿La rapidez de un objeto que cae depende de su masa?

72. ¿De qué manera un astronauta en un transbordador espacial

¿La rapidez de un satélite en órbita depende de su masa?

podría "soltar" un objeto verticalmente hacia la Tierra?

Defiende tus respuestas.

73. Una nave espacial en una órbita alta viaja a 7 km/s con

58. ¿De qué no depende la rapidez de un satélite en órbita: la respecto a la Tierra. Supón que proyecta una cápsula

masa del satélite, la masa de la Tierra o la distancia del

hacia atrás a 7 km/s con respecto a la nave. Describe la

satélite de la Tierra?

trayectoria de la cápsula con respecto a la Tierra.

59. Un objeto que se mueve en círculos necesita una fuerza

74. Un satélite en órbita circular alrededor de la Luna dispara

centrípeta. ¿Qué proporciona esta fuerza para satélites

una pequeña sonda en dirección opuesta a la velocidad del

que orbitan la Tierra?

satélite. Si la rapidez de la sonda en relación con el satélite es

60. Si alguna vez has observado el lanzamiento de un saté-

la misma que la rapidez del satélite en relación con la Luna,

lite terrestre, es posible que hayas notado que el cohete

describe el movimiento de la sonda. Si la rapidez relativa de

parte verticalmente hacia arriba, luego se aleja de un curso

la sonda es el doble de la rapidez del satélite, ¿por qué repre-

vertical y continúa su ascenso con un ángulo. ¿Por qué

sentaría un peligro para el satélite?

parte verticalmente? ¿Por qué no continúa verticalmente?

75. La velocidad orbital de la Tierra alrededor del Sol es de

61. Si una bala de cañón se dispara desde una alta montaña,
30 km/s. Si la Tierra se detuviera de manera repentina en
la gravedad cambia su rapidez durante toda su trayectoria.
su recorrido, simplemente caería en sentido radial hacia el
Pero si se dispara tan rápido que entra en órbita circular, la
Sol. Un líder del congreso sugiere disparar un cohete car-
gravedad no cambia su rapidez en absoluto. Explica.
gado con desechos radiactivos hacia el Sol para su desecho
62. Cuando un satélite en órbita circular frena, acaso debido
permanente. Para que esto ocurra, ¿con qué rapidez y en
al disparo de un "retrocohete", termina adquiriendo más
qué dirección con respecto a la órbita de la Tierra debería
rapidez de la que tenía en un inicio. ¿Por qué?
dispararse el cohete?

76. Si detienes el movimiento de un satélite terrestre en su
durante esta maniobra se cancelan a cero. Otro compañero te
recorrido, simplemente chocaría con la Tierra. ¿Por qué,
mira buscando tu confirmación. ¿Cuál es tu respuesta?
entonces, los satélites de comunicaciones que "flotan sin
81. ¿En cuál de las posiciones indicadas el satélite en una órbita
movimiento" arriba del mismo punto sobre la Tierra no cho-
elíptica experimenta la mayor fuerza gravitacional? ¿Tiene la

can con la Tierra?

mayor rapidez? ¿La mayor velocidad? ¿La mayor cantidad de

77. ¿Cuál es la ventaja de lanzar vehículos espaciales desde

movimiento? ¿La mayor energía cinética? ¿La mayor energía

aeronaves de vuelo alto en lugar de hacerlo desde el suelo?

potencial gravitacional? ¿La mayor energía total? ¿La mayor

78. ¿Qué necesita menos combustible: lanzar un cohete a rapi-

cantidad de movimiento angular? ¿La mayor aceleración?

dez de escape desde la Luna o desde la Tierra? Defiende tu

respuesta.

B

79. ¿Cuál es la máxima rapidez de impacto posible sobre la super-

ficie de la Tierra para un cuerpo lejano inicialmente en reposo

C

que cae a la Tierra en virtud sólo de la gravedad terrestre?

A

80. Como parte de su entrenamiento antes de ir a órbita, los astro-

D

nautas experimentan ingravidez cuando montan en un avión

que vuela a lo largo de la misma trayectoria parabólica que un

82. ¿En qué punto de su órbita elíptica alrededor del Sol la

proyectil en caída libre. Un compañero de clase dice que las

aceleración de la Tierra hacia el Sol es un máximo? ¿En

fuerzas gravitacionales en todas partes dentro del avión

qué punto es un mínimo? Defiende tus respuestas.

P I E N S A Y D I S C U T E *(E V A L U A C I Ó N)*

83. Para un alcance máximo, un balón de fútbol debe patearse

92. En 2000-2001, la nave espacial Near Earth Asteroid Ren-

a aproximadamente 458 con la horizontal, un poco menos

dezvous (NEAR, Encuentro de Asteroides Cercanos a la

debido a la resistencia aerodinámica. Pero las patadas de

Tierra) de la NASA orbitó alrededor del asteroide Eros, de

despeje con frecuencia se patean a ángulos mayores que

20 mil as de largo. ¿Consideras que la rapidez orbital de

458. Discute por qué esto es así.

esta nave espacial es mayor o menor que 8 km/s? Discute y

84. Un amigo afirma que las balas disparadas por algunos

defiende tu respuesta.

fusiles de alto poder viajan durante muchos metros en línea

93. ¿Cuáles dos planetas nunca se ven a medianoche y por qué?

recta antes de comenzar a caer. Otro amigo contradice esta

94. ¿Por qué un satélite se quema cuando desciende hacia la

afirmación y manifiesta que todas las balas de cualquier fusil

atmósfera? ¿Y por qué no se quema cuando asciende por

caen abajo de una trayectoria en línea recta una distancia

la atmósfera?

vertical dada por 1 2

gt y que la trayectoria curva es aparente

95. ¿Un satélite puede mantener una órbita en el plano del
para bajas velocidades y menos aparente para altas velocida-
Círculo Ártico? ¿Por qué sí o por qué no?
des. Ahora es tu turno: discute si todas las balas disparadas
96. Lees en un artículo sobre astronautas de una importante
caen o no la misma distancia vertical en tiempos iguales.
revista que "aproximadamente 62 millas arriba, la atmós-
85. Marte tiene aproximadamente 19 la masa de la Tierra.
fera termina y la gravedad se vuelve muy débil. .". ¿Qué
Si Marte de algún modo se colocara en la misma órbita
error se comete aquí?
que la de la Tierra, discute cuál sería la diferencia entre
97. Discute el requisito de que un dispositivo GPS necesita
el tiempo que le tomaría dar una vuelta al Sol y el que le
información proveniente de al menos tres satélites GPS y
toma a la Tierra. (¿Más largo, más corto o el mismo?)
por qué un satélite "muy bueno" no puede hacer la tarea.
86. ¿La rapidez de un satélite en órbita circular cercana
98. En una explosión accidental, un satélite se rompe a la
alrededor de Júpiter sería mayor, igual o menor a 8 km/s?
mitad mientras está en órbita circular alrededor de la
87. ¿Por qué, en general, para poner los satélites en órbita se dis-
Tierra. Una mitad queda momentáneamente en reposo.

paran en una dirección hacia el este, la dirección en la que
¿Cuál es el destino de la mitad que queda en reposo?
gira la Tierra? Y discute por qué las posiciones cercanas al
Discute lo que ocurre con la otra mitad.
ecuador son las favoritas.
99. Una gigantesca rueda giratoria en el espacio proporciona
88. Discute por qué Hawái es el sitio de lanzamiento más efi-
gravedad artificial para sus ocupantes, como se estudió en
ciente en Estados Unidos para los satélites no polares. En tu
el Capítulo 8. En lugar de una rueda completa, discute la
discusión incluye un vistazo al giro de la Tierra desde arriba
idea de un par de cápsulas unidas mediante una cuerda
de cualquier polo y compáralo con una tornamesa que gira.
de sujeción y que giren una en torno a la otra. ¿Tal arreglo
89. Discute por qué un satélite puede orbitar a 5 km sobre la
puede proporcionar gravedad artificial a los ocupantes?
Luna, pero no a 5 km sobre la Tierra.
100. Un cohete viaja en una órbita elíptica alrededor de la Tie-
90. Un satélite de comunicaciones con un periodo de 24 horas
rra. A fin de lograr la mayor cantidad de EC para el escape
flota sobre un punto fijo sobre la Tierra y, para los observadores
con una cantidad dada de combustible, ¿debe disparar
terrestres, parece inmóvil. ¿Por qué se coloca sólo en una órbita
sus motores para acelerar hacia adelante cuando está en el

en el plano del ecuador de la Tierra? En tu discusión, piensa

apogeo o en el perigeo? (Sugerencia: guía tu razonamien-

que la órbita del satélite es un anil o que circunda la Tierra.

to con la fórmula Fd 5 DEC. Supón que el empuje F es

91. Un satélite terrestre "geosíncrono" puede permanecer

breve y de la misma duración en cualquier caso. Luego

casi directamente arriba de Singapur, mas no de San

considera la distancia d que recorrería el cohete durante

Francisco. Discute por qué esto es así.

esta breve explosión en el apogeo y en el perigeo.)

206

PA R T E U N O

M EC Á N I C A

P A R T E U N O *Examen de práctica de opción múltiple*

Elige la MEJOR respuesta para cada uno de los siguientes:

15. La relación impulso-cantidad de movimiento es un resultado

directo de la

de Newton.

1. El lenguaje de la ciencia es

(a) primera ley

(c) tercera ley

(a) matemáticas. (b) latín. (c) chino. (d) árabe.

(b) segunda ley

(d) ley de gravedad

2. Alguien que dice "eso es sólo una teoría" probablemente no

16. Un gran pez nada hacia un pequeño pez en reposo y lo traga. Justo sepa que una teoría científica es

después de almorzar, el gran pez engordado tiene un cambio de

(a) una suposición informada.

(a) rapidez.

(c) Ambos.

(b) una hipótesis.

(b) cantidad de movimiento. (d) Ninguno.

(c) una gran síntesis de hipótesis y hechos bien comprobados.

17. El trabajo realizado sobre una caja de 100 kg que se eleva 2 m

(d) Ninguna de las anteriores.

en un tiempo de 4 s es

3. La fuerza necesaria para mantener una bola rodando por una

(a) 200 J. (b) 500 J. (c) 800 J. (d) 2,000 J.

bolera

18. La potencia requerida para elevar una caja de 100 kg una dis-

(a) se debe a la gravedad.

tancia vertical de 2 m en un tiempo de 4 s es

(b) es una fuerza inercial.

(a) 200 W. (b) 500 W. (c) 800 W. (d) 2,000 W.

(c) es una brisa ligera.

19. Cuando un automóvil prototipo acelera hasta tres veces su rapi-

(d) Ninguna de las anteriores.

dez original, su energía cinética es

4. La regla de equilibrio, g F 0, se aplica a objetos

(a) la misma.

(c) tres veces mayor.

(a) en reposo.

(b) el doble.

(d) Ninguna de las anteriores.

(b) que se mueven con velocidad constante.

20. Para levantar una caja de 100 N con un sistema ideal de poleas

(c) Ambas.

jalas una soga hacia abajo con 25 N de fuerza. Por cada 1 m de

(d) Ninguna.

longitud de soga jalada hacia abajo, la caja se eleva

5. Si la gravedad entre el Sol y la Tierra súbitamente desaparece, la (a) 25 cm. (b) 25 m. (c) 50 cm. (d) Ninguna de las anteriores.

Tierra seguiría moviéndose en

21. Cuando 100 J se ponen en un dispositivo que pone 40 J de tra-

(a) una curva.

bajo útil, la eficiencia del dispositivo es

(b) una línea recta.

(a) 40%. (b) 50%. (c) 60%. (d) 140%.

(c) una espiral hacia afuera.

22. Una máquina no puede multiplicar

(d) una espiral hacia adentro.

(a) fuerzas.

(c) energía.

6. La rapidez promedio de una gacela que recorre una distancia de

(b) distancias.

(d) Ninguna de las anteriores.

2 km en un tiempo de media hora es

23. Cuando una lata se hace girar en un círculo horizontal, la

(a) 1 km/h. (b) 2 km/h. (c) 4 km/h. (d) mayor que 4 km/h.

fuerza neta sobre la lata actúa

7. Un objeto en caída libre experimenta un aumento en

(a) hacia adentro.

(c) hacia arriba.

(a) rapidez. (b) aceleración. (c) tanto rapidez como aceleración.

(b) hacia afuera.

(d) Ninguna de las anteriores.

8. Dos vectores, uno de 3 N y el otro de 4 N, pueden tener una

24. Un momento de torsión es una fuerza

resultante de

(a) como cualquiera otra fuerza.

(a) 0 N. (b) 5 N. (c) 8 N. (d) Cualquiera de ellos.

(b) multiplicada por un brazo de palanca.

9. Una fuerza de 10 N en un ángulo de 458 sobre la horizontal

(c) que es ficticia.

tiene una componente horizontal de aproximadamente

(d) que acelera cosas.

(a) 7 N. (b) 5 N. (c) 10 N.

25. La inercia rotacional de un objeto es mayor cuando la mayor

10. El hecho de que la aceleración de caída libre sea la misma para

parte de su masa se ubica

todas las masas se explica por la

de Newton.

(a) cerca del eje de rotación.

(c) sobre el eje de rotación.

(a) primera ley

(c) tercera ley

(b) lejos del eje.

(d) fuera del centro.

(b) segunda ley

(d) ley de acción-reacción

26. Si el Sol fuera el doble de masivo, su tirón sobre Marte sería

11. La cantidad de resistencia aerodinámica sobre una ardilla volado-

(a) invariable.

(c) de la mitad.

ra de 0.8 N que se suelta verticalmente con velocidad terminal es

(b) del doble.

(d) cuatro veces mayor.

(a) menor que 0.8 N.

27. Las mareas oceánicas más altas ocurren cuando la Tierra y la

(b) 0.8 N.

Luna están

(c) más de 0.8 N.

(a) alineadas con el Sol.

(d) depende de la orientación de su cuerpo.

(b) en ángulos rectos con el Sol.

12. Cuando una bala de cañón se dispara desde un cañón, tanto la

(c) en cualquier ángulo con el Sol.

bala como el cañón experimentan iguales

(d) alineadas durante la primavera.

(a) cantidades de fuerza.

(c) Ambos.

28. La componente de velocidad que puede permanecer constante

(b) aceleraciones.

(d) Ninguna.

para una pelota de béisbol lanzada es

13. El equipo que gana en una competencia de jalar la cuerda es el

(a) horizontal.

(c) Cualquiera de ellas.

equipo que

(b) vertical.

(d) Ninguna de ellas.

(a) produce más tensión en la cuerda que el oponente.

29. La magnitud de la fuerza gravitacional sobre un satélite es cons-

(b) empuja más duro sobre el suelo.

tante si la órbita es

(c) Ambos.

(a) parabólica. (b) circular. (c) elíptica. (d) Todas ellas.

(d) Ninguno.

30. Un satélite en la órbita terrestre está arriba de

14. Un avión con su nariz apuntando al norte, con una rapidez de

(a) la atmósfera terrestre.

(c) Ambos.

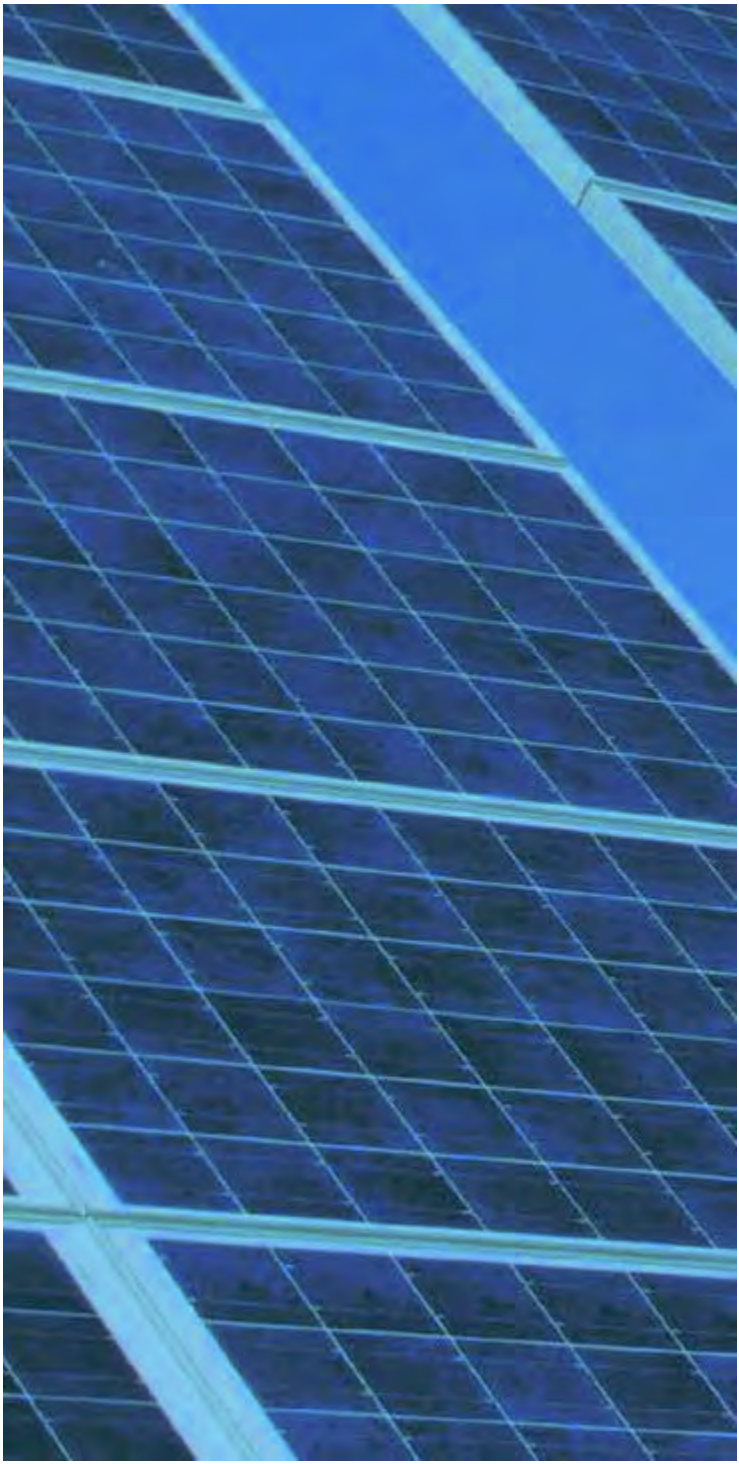
viento de 40 km/h, en un viento cruzado (en ángulo recto)

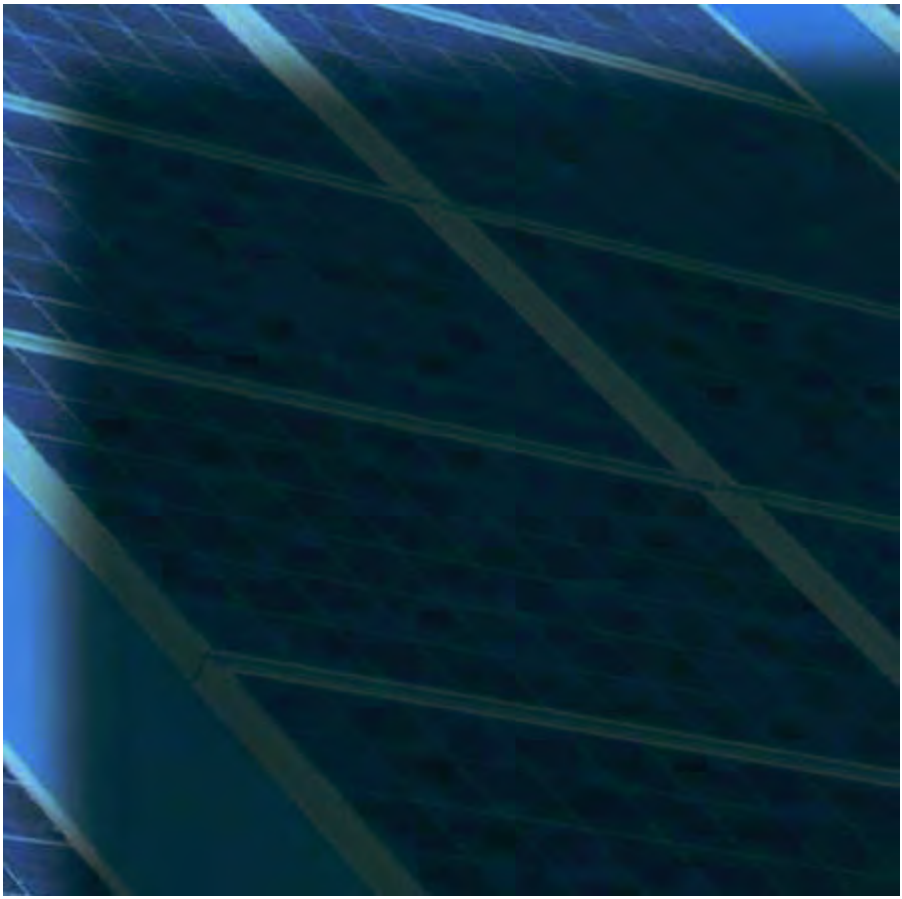
(b) el campo gravitacional terrestre. (d) Ninguno.

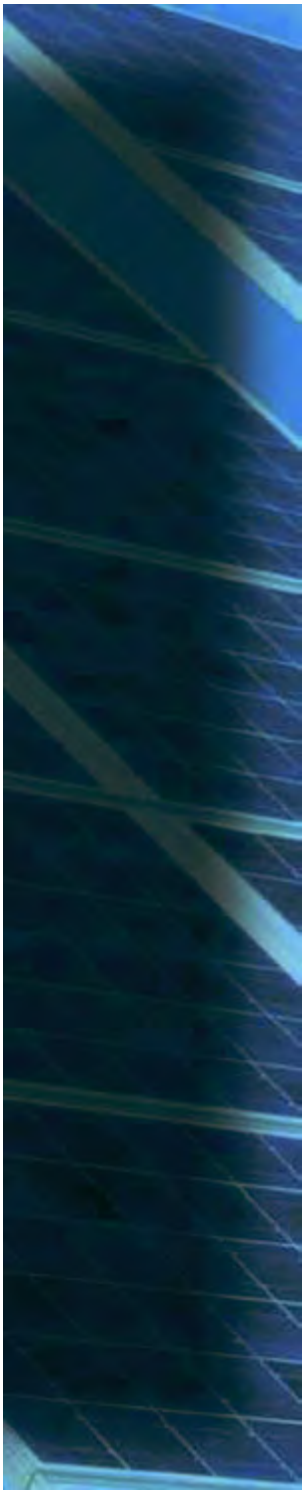
de 30 km/h, tiene una rapidez respecto del suelo de

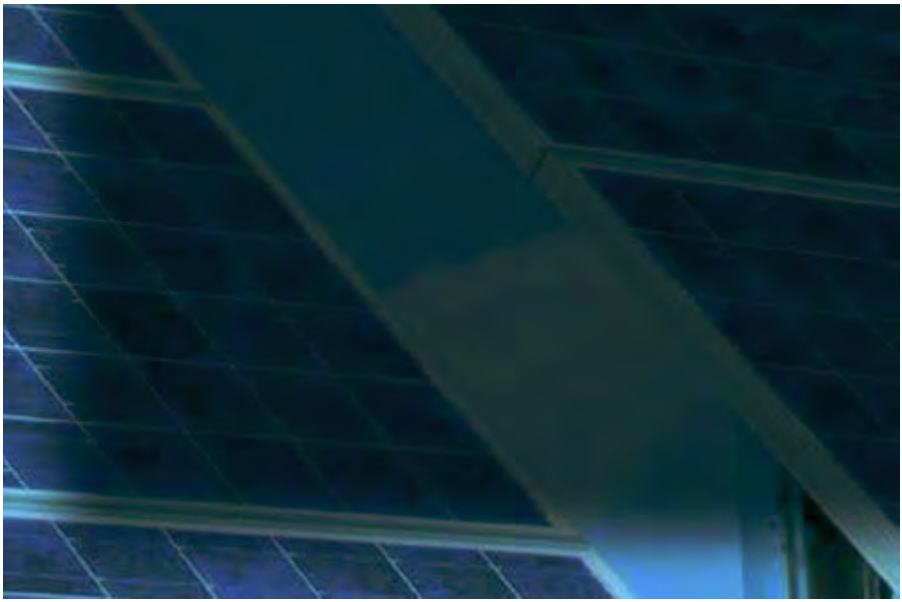
(a) 30 km/h. (b) 40 km/h. (c) 50 km/h. (d) 60 km/h.

Después de hacer elecciones razonadas, y discutirlas con tus amigos, busca las respuestas en la página S-1.









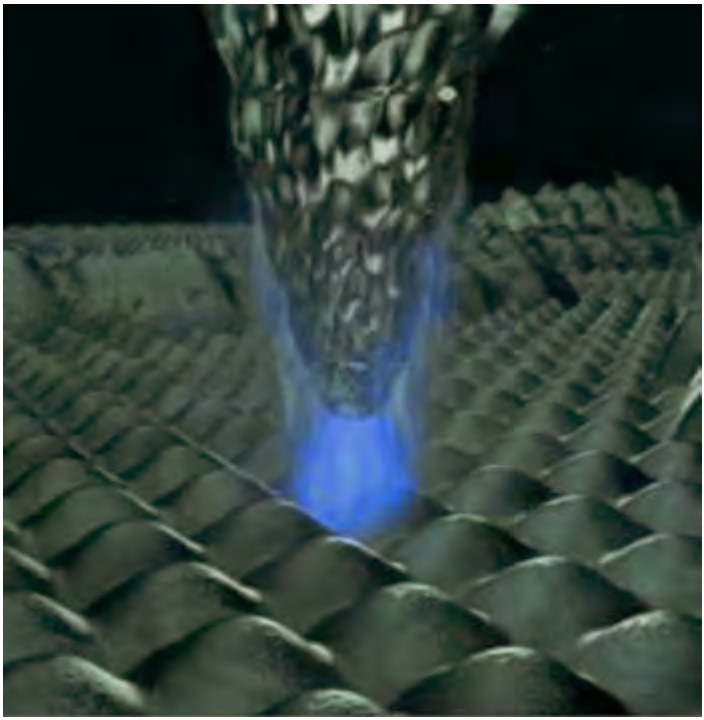
P A R T E D O S

Propiedades

de la materia

Al igual que todos, yo estoy hecho de átomos. Son tan pequeños y numerosos que inhalo miles de mil ones de bil ones de átomos con cada bocanada de aire. Exhalo algunos de el os de inmediato, pero otros átomos

permanecen durante algún tiempo y se vuelven parte de mí, muchos de los cuales exhalo después. Otras personas respiran algunos de el os, de modo que se convierten en parte de mí. Los átomos que constituyen mi cuerpo alguna vez estuvieron en los cuerpos de personas de todas partes del mundo. Más aún, dado que existen más átomos en una bocanada de aire que el número total de seres humanos desde el tiempo cero, en cada bocanada que tú y yo inhalamos, reciclamos átomos que alguna vez fueron parte de cada persona que ha vivido. ¡Oye, en este sentido, todos somos uno!



11 ***1***

C A P Í T U L O 1 1

La naturaleza ***2***

atómica de

la materia

11.1 La hipótesis atómica

3

11.2 Características de los átomos

11.3 Imágenes atómicas

11.4 Estructura atómica

11.5 La tabla periódica de los elementos

11.6 Isótopos

11.7 Compuestos y mezclas

11.8 Moléculas

4

11.9 Antimateria

1 *Representación artística de la punta de un microscopio de sonda de barrido (SPM), que mapea las posiciones relativas de los átomos sobre la superficie de un material. La punta también puede usarse para mover cada átomo como se desee o para dibujar patrones, como los que se necesitan para los circuitos integrados ultrapequeños.* ***2*** *El extraordinario físico del siglo XX, Richard P. Feynman.* ***3*** *Representación de una molécula de ADN, la materia de la vida.* ***4*** *Tucker Hiatt analiza con sus alumnos las propiedades del buckminsterfullereno, o buckybola para abreviar, hecha de 60 átomos de carbono y que se asemeja a la esfera geodésica inventada por Buckminster Fuller.*

para este panel que, tristemente, fue su última aparición en público. Todos sabíamos que luchaba contra el cáncer.

La mayoría de las personas, cuando se les pregunta
quién fue el físico más destacado del siglo XX, es
probable que respondan Albert Einstein. Cuando a
En el panel casi me quedé atónito cuando me di cuenta
los físicos se les pregunta quién fue el físico más inquieto
de que él y yo debatíamos no sobre cómo debía enseñarse
y pintoresco del siglo XX, si su respuesta no es Einstein,
la física en el bachillerato, sino más bien si debía enseñar -
probablemente será Richard Feynman. Este capítulo trata
se siquiera. A Feynman le gustaban los puntos de vista
de los átomos, el tema primordial de la obra y la enseñan-
extremos, y su postura era que la física no debía enseñarse
za de Feynman que condujo a una mejor comprensión del
en el bachillerato porque la mayoría de los profesores care-
átomo y a un Premio Nobel de Física para él. Si has leído
cía de pasión por la materia. Esta falta de pasión se trans-
el libro de Feynman, Surely You're Joking, Mr. Feynman!
mitiría a los estudiantes, quienes estarían mejor si llegaban
(¿Está usted de broma, Sr. Feynman?), sabrás que, además
a la universidad como una pizarra en blanco. Mi postura
de su amor por la física, estaba muy interesado en cómo se
era que la física debía enseñarse de manera conceptual,
enseña la física, particularmente en el bachillerato.
con alguna clase de resolución de problemas como segun-

Tuve el privilegio de estar en un panel de profesores con

da asignatura de física: que los conceptos centrales de la

Feynman en una reunión de educadores en física en 1987.

física debían ser familiares para todos los alumnos y que

El panel abordó la cuestión de qué tipo de física debe ense-

la física, al igual que la matemática, la lengua y la histo-

ñarse en el bachillerato. Cuando llegué a la escuela donde

ria, debían constituir el grueso de la educación. Feynman

se realizaba la reunión, vi a Feynman de pie en el salón,

rebatió que un problema importante de mi postura era el

solo. Era sabido que, con frecuencia, Feynman estaba solo

número insuficiente de profesores de física capacitados.

en tales reuniones, pues los profesores se sentían incómo-

¿De dónde provendrían? Mi respuesta fue que, si la clase

dos en su presencia. ¿De qué hablas con alguien como se hacía muy agradable, a más del porcentaje actual de Feynman? Yo tenía algo de qué hablar porque le habían

estudiantes les gustaría la física, luego se especializarían

enviado un ejemplar de mi nueva versión de Física Con-

en ella y en 10 años tendrían la categoría de los profesores

ceptual para bachillerato, y quería conocer sus impresiones

que se necesitaban.

sobre la obra. Para mi regocijo,

Unos 10 años después, en una reunión de física en Las

más no para mi sorpresa, lo había

Vegas, un joven me detuvo en el salón para decirme cómo

leído de principio a fin, a juzgar

mi libro lo había motivado a especializarse en física y luego

por las mejoras que me reco-

convertirse en profesor de física. También expresó una

mendó para la siguiente edición.

pasión por la física. Pensé: "¿Escuchaste eso, Richard?" Por-

Como lo deja en claro su libro que era cierto, la orientación conceptual de la física ayudó Joking, Feynman "hizo su tarea"

a aumentar las filas de nuevos profesores de física. Mi lema

antes de sus ponencias. Había desde entonces ha sido que, si la primera clase de física de leído mi libro y varios otros libros

un alumno es sensacional, entonces el rigor de un segundo

de bachillerato en preparación curso será bien recibido.

***11.1** La hipótesis atómica*

La idea de que la materia está compuesta de átomos se remonta a los griegos del si -

Si, en algún cataclismo, todo el co-

glo V a. C. Los investigadores de la naturaleza de ese entonces se preguntaban si la nocimiento científico se destruyera

materia era continua o no. Es posible romper una roca en guijarros, y los guijarros en y sólo una frase pudiera transmi-grava fina. La grava puede romperse en arena fina, que luego puede reducirse a polvo.

tirse a la siguiente generación de

Para los griegos del siglo V había un trozo de roca muy pequeño, un "átomo", que ya criaturas, Richard Feynman eligió

no podía dividirse más.

ésta: "Todas las cosas están hechas

Aristóteles, el más famoso de los primeros filósofos griegos, no estuvo de acuerdo de átomos, pequeñas partículas

con la idea de los átomos. En el siglo IV a. C., Aristóteles enseñó que toda la materia que se mueven con movimiento

perpetuo, se atraen mutuamente

estaba compuesta de varias combinaciones de cuatro elementos: tierra, aire, fuego y cuando están un poco separadas,

agua. Esta visión parecía razonable porque, en el mundo circundante, la materia se ve pero se repelen cuando se les

sólo en cuatro formas: sólidos (tierra), gases (aire), líquidos (agua) y el estado de flamas presiona unas contra otras". La

(fuego). Los griegos consideraban al fuego como el elemento de cambio, pues observa-idea de que la materia está com-

ban que el fuego producía cambios en las sustancias que quemaba. Las ideas de Aris-puesta de átomos es un cimiento

tóteles acerca de la naturaleza de la materia persistieron durante más de 2,000 años.

central de toda la ciencia.

La idea atómica fue revivida a principios del siglo XIX, por un meteorólogo y profesor inglés, John Dalton. Él logró explicar la naturaleza de las reacciones químicas

PA R T E D OS

P RO P I EDA D ES D E L A M AT ER I A

LA CAÍDA DE ALICIA

Imagina que habitas el mundo de Alicia en el País de las sólidas vibran y se pliegan. Las superficies que vibran consisten en Maravillas cuando se encoge de tamaño. Imagina que caes

burbujas nebulosas, principalmente esféricas, algunas con forma

de una silla y bajas con movimiento lento hasta el suelo, y

de huevo, algunas más grandes que otras, y todas escurriendo unas

mientras caes, te encoges continuamente. Cobras ánimo para recibir

hacia otras, para formar largas cadenas de complicadas estructuras.

el impacto sobre el suelo de madera. A medida que te acercas cada

Al caer todavía más, cobras ánimo para el impacto a medida que

vez más, y te vuelves más y más pequeño, observas que la superficie

te aproximas a una de estas esferas nebulosas, cada vez más cerca,

del suelo no es tan lisa como parecía al principio. Aparecen grandes

cada vez más pequeño, y... ¡hala! Entras en lo que parece ser un

grietas que son las irregularidades microscópicas que se encuentran

nuevo universo. Caes en un mar de vacío, ocupado por partículas

en toda madera. Al caer en una de esas grietas con el tamaño de un

ocasionales que pasan girando a rapideces increíblemente altas. Estás barranco, de nuevo cobras ánimo para el impacto, sólo para descubrir

en un átomo, tan vacío de materia como el sistema solar. El suelo que el fondo del barranco consiste en muchas otras grietas. Al caer

sólido hacia el que caíste es, excepto por las partículas de materia aquí más mientras te vuelves más pequeño, observas que las paredes

y allá, principalmente espacio vacío. Entraste al mundo del átomo.

*al proponer que toda la materia estaba hecha de **átomos**. Sin embargo, él y otros de la época no tenían evidencia directa de su existencia. Entonces, en 1827, un botánico escocés llamado Robert Brown observó algo muy raro en su microscopio. Mientras estudiaba granos de polen suspendidos en agua, vio que los granos se movían continuamente y saltaban. Al principio pensó que los granos eran algún tipo de formas de vida en movimiento, pero más tarde descubrió que las partículas de polvo y los granos de hollín suspendidos en agua se movían de la misma manera. Este zangoloteo perpetuo y azaroso de las partículas pequeñas, ahora llamado **movimiento browniano**, resulta de colisiones entre partículas visibles y átomos invisibles. Los átomos son invisibles porque son muy pequeños. Aunque no podía ver los átomos, Brown podía ver el efecto **F I G U R A 1 1 . 1***

que tenían sobre las partículas que sí podía ver. Es como una pelota de playa super-Un modelo del átomo de principios

gigante que rebota entre una multitud en un juego de fútbol. Desde un avión que vuela el siglo XX, con un núcleo central

a gran altura, no verías a las personas porque son pequeñas en relación con la enorme y electrones en órbita, muy parecido a

pelota, la que sí podrías ver. Los granos de polen que Brown observó se movían por -

un sistema solar con planetas en órbita.

que eran empujados constantemente por los átomos (en realidad, por las combinaciones atómicas conocidas como moléculas) que constituyen el agua que los rodea.

Albert Einstein explicó el movimiento browniano en 1905, el mismo año en que anunció la teoría de la relatividad especial. Hasta la explicación de Einstein, que permitió descubrir las masas de los átomos, muchos físicos prominentes seguían escép-SCREENCAST: Átomos

ticos acerca de la existencia de éstos. Así puedes ver que la realidad del átomo no se estableció firmemente sino hasta principios del siglo XX.

***11.2** Características de los átomos*

No puedes ver los átomos porque

***Los átomos son increíblemente pequeños** Un átomo es muchas veces más peque-son muy pequeños. Tampoco*

ño que tú, como una estrella promedio es más grande que tú. Una forma bella de decir-puedes ver las estrellas más leja-

lo es que estás entre los átomos y las estrellas. Otra forma más de establecer la pequeñez nas. Hay mucho que no puedes ver

con los ojos. Pero esto no impide

de los átomos es que el diámetro de un átomo es al diámetro de una manzana, lo que que se investiguen tales cosas, de

el diámetro de una manzana es al diámetro de la Tierra. Así que, para imaginar una modo que puedan "verse" a través

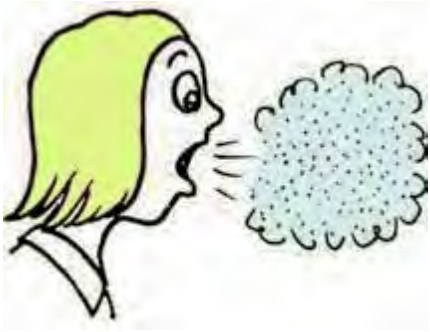
manzana llena de átomos, piensa en la Tierra atiborrada de manzanas. Ambas tienen de instrumentos.

aproximadamente el mismo número.

***Los átomos son numerosos** En un gramo de agua (una pizca) hay alrededor de 100,000,000,000,000,000,000,000 átomos. En notación científica, esto es 1023 átomos. El número 1023 es un número enorme, más que el número de gotas de agua en todos los lagos y ríos del mundo.*

De modo que hay más átomos en una pizca de agua ***VIDEO: Evidencia de los átomos***

que gotas de agua en los lagos y ríos del mundo. En la atmósfera hay alrededor de 1023 átomos en un litro de aire. Es muy interesante que el volumen de la atmósfera



contenga alrededor de 1023 litros de aire. Éste es un número

increíblemente grande de átomos, y el mismo número increíblemente grande de litros de atmósfera. Los átomos son tan pequeños y tan numerosos que hay más o menos tantos átomos en el aire de tus

¿Cuánto tardarías en contar

pulmones en cualquier momento que bocanadas de aire en la atmósfera de la Tierra.

hasta 1 millón? Si cada conteo tar-

da 1 segundo, contar sin parar has-

Los átomos tienen movimiento perpetuo *En los sólidos, los átomos vibran en su ta un millón te tomaría 11.6 días.*

lugar; en los líquidos, migran de una posición a otra, y en los gases, el rango de migra-Para contar hasta mil millones (109)

ción es incluso mayor. Las gotas de colorante en un vaso de agua, por ejemplo, pronto tardarías 31.7 años. Para contar

hasta un billón (1012) tardarías

se dispersan para colorear todo el vaso de agua. Lo mismo sucedería con un vaso lleno 31,700 años. ¡Contar hasta 1023

de colorante lanzado al océano: se dispersaría y con el tiempo se encontraría en cada te tomaría más de 10,000 veces la

parte de los océanos del mundo.

edad del Universo!

Los átomos y las moléculas de la atmósfera pasan con rapideces de hasta 10 veces la rapidez del sonido. Se dispersan rápidamente, de modo que algunas de las moléculas de oxígeno que respiras tal vez estuvieron a medio país de distancia hace algunos días. Si se analiza un poco más la Figura 11.2, se ve que tus bocanadas de aire exhaladas muy pronto se mezclan con otros átomos en la atmósfera. Después de los pocos años que tarda tu respiración en mezclarse de manera uniforme en la atmósfera, cualquier persona, en cualquier lugar de la Tierra, que inhale una bocanada de aire ingerirá, en promedio, uno de los átomos que se encontraban en tu bocanada exhalada. Pero tu exhalas muchas, muchas bocanadas, de modo que otras personas respiran muchos, muchos átomos que alguna vez estuvieron en tus pulmones, que alguna vez fueron parte de ti, y, desde ***F I***

G U R A 11. 2

luego, viceversa. Lo creas o no, con cada bocanada que inhalas, ¡respiras átomos que al- Existen tantos átomos en una bocanada guna vez fueron parte de todas las personas que han vivido! Si consideras que los átomos normal de aire como bocanadas de aire que exhalas fueron parte de tu cuerpo (el olfato de un perro no tendría problemas para hay en la atmósfera de la Tierra.

distinguirlo), puede decirse con seguridad que literalmente nos respiramos unos a otros.

Los átomos son intemporales *Muchos átomos de tu cuerpo son casi tan viejos como el mismísimo Universo. Cuando respiras, por ejemplo, sólo algunos de los átomos que inhalas se exhalan en tu siguiente respiración. Los átomos restantes se incorporan en tu cuerpo para volverse parte de ti, y después dejan tu cuerpo por varios medios. Tú no* ***VIDEO: Los átomos son reciclables***

"posees" los átomos que constituyen tu cuerpo; los pides prestados. Todos comparten del mismo acervo de átomos, porque los átomos migran por siempre alrededor, en el interior de las personas y entre ellas. Los átomos circulan de persona a persona mientras respiran y mientras se vaporiza el sudor. Las personas reciclan átomos a gran escala.

El origen de los átomos más ligeros se remonta al origen del Universo, y los átomos más pesados son más viejos que el Sol y la Tierra. Hay átomos en tu cuerpo que han existido desde los primeros momentos del tiempo, y se reciclan por todo el Universo entre innumerables formas, tanto no vivas como vivas. Tú eres el actual cuidador de los átomos de tu cuerpo. Habrá muchos que vendrán después.

P U N T O D E C O N T R O L

La vida no se mide por el número

1. ¿Cuáles son más viejos: los átomos del cuerpo de un anciano o los del *de respiraciones que realizamos,*

cuerpo de un bebé?

sino por los momentos que nos

roban el aliento.— George Carlin

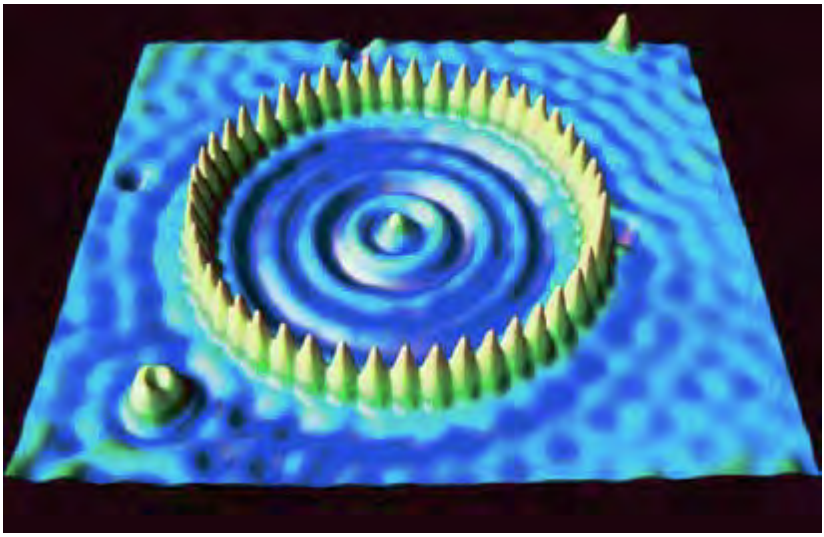
2. La población mundial crece cada año. ¿Esto significa que la masa

de la Tierra aumenta cada año?

3. ¿Realmente existen átomos que alguna vez fueron parte de Albert Einstein incorporados en los cerebros de todos los miembros de tu familia?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *La edad de los átomos en los dos es la misma. La mayoría de los átomos fueron fabricados en estrellas que explotaron antes de que existiera el sistema solar.*



2. *El mayor número de personas aumenta la masa de la Tierra en cero. Los átomos que constituyen nuestros cuerpos son los mismos átomos que estuvieron aquí antes de que naciéramos: no somos más que polvo y al polvo regresaremos. Los materiales que constituyen las células humanas son reordenamientos de material ya presente. Los átomos que constituyen un bebé que se forma en el útero de su madre son suministrados por los alimentos que come la madre. Y dichos átomos se originaron en las estrellas, algunas de ellas en galaxias muy lejanas. (Es interesante que la masa de la Tierra sí aumenta por la incidencia de aproximadamente 40,000*

toneladas de polvo interplanetario cada año, pero no por el nacimiento y la super-vivencia de más personas.)

3. *Muy cierto, y también de Barack Obama. Sin embargo, dichos átomos se combinan de forma diferente a como estaban antes. Si experimentas uno de esos días en los que sientes que no importas mucho, reconfórtate con el pensamiento de que muchos de los átomos que ahora constituyen tu cuerpo vivirán por siempre en los cuerpos de todas las personas sobre la Tierra que todavía no nacen. Tus átomos son inmortales.*

11.3 *Imágenes atómicas*

Los átomos son muy pequeños para verse con luz visible. Debido a la

difracción, puedes discernir detalles no menores que la longitud de onda de la luz que usas para mirar. Esto se puede entender mediante una analogía con las olas. Un barco es mucho más grande que las olas que pasan junto a él. Como muestra la Figura 11.3, las ondas acuáticas pueden revelar características del barco. Las ondas se difractan cuando pasan por el barco.

Pero la difracción es nula cuando pasan por la cadena del ancla, lo que revela poco o nada acerca de ella. De igual modo, las ondas de luz visible son muy burdas comparadas con el tamaño de un átomo para mostrar detalles del tamaño y la forma atómicos.

Sin embargo, en la Figura 11.4 se ve una fotografía de átomos: la histórica imagen de 1970 de cadenas de átomos de torio individuales. En realidad la imagen es una micrografía electrónica tomada con un pequeño haz de electrones en un microscopio ***F I G U R A 1 1 . 3***

electrónico de barrido (MEB, o SEM por sus siglas en inglés), desarrollado por Albert Las ondas que pasan revelan infor-Crewe en el Instituto Enrico Fermi de la Universidad de Chicago. Un haz de electrones, mación del barco, porque la distancia

como el que proyecta una imagen sobre la pantalla de uno de los primeros televisores, es entre las crestas de las ondas es pequeña

un chorro de partículas que tienen propiedades ondulatorias. La longitud de onda de un comparada con el tamaño del barco. Las

ondas que pasan no revelan nada acerca

haz de electrones es menor que las longitudes de onda de la luz visible, y los átomos son de la cadena.

más grandes que las pequeñas longitudes de onda de un haz de electrones. La micrografía electrónica de Crewe es la primera imagen de alta resolución de átomos individuales.

A mediados de la década de 1980, los investigadores crearon un nuevo tipo de microscopio: el microscopio de efecto túnel (MET, o STM por sus siglas en inglés). Este microscopio emplea una punta aguda que barre una superficie a una distancia de algunos diámetros atómicos punto por punto y línea por línea. En cada punto, una pequeña corriente eléctrica, llamada corriente de tunelización, se mide entre la punta y la superficie. Las variaciones de corriente revelan la topología de la superficie. La imagen de la Figura 11.5 muestra de una manera muy bella la posición de un anillo de átomos.

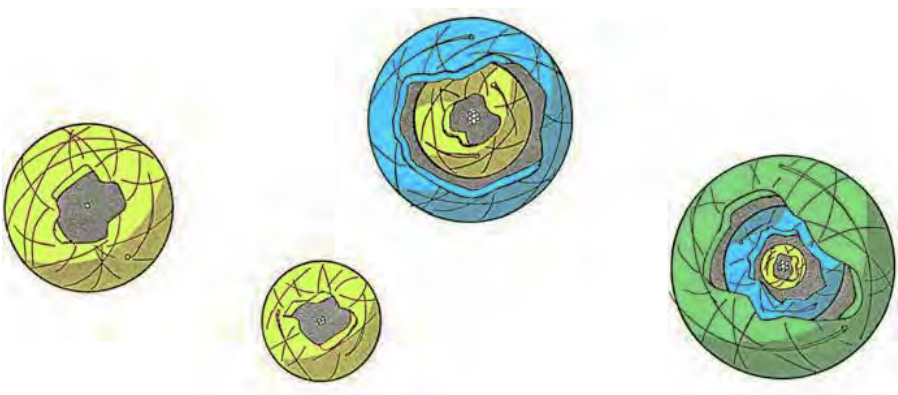
Las ondulaciones que se muestran en el anillo revelan la naturaleza ondulatoria de la ***F I G U R A 1 1 . 4***

Las cadenas de puntos son cadenas de átomos de torio visualizados con un microscopio electrónico de barrido. Esta fotografía histórica de átomos individuales fue tomada en 1970 por investiga-

F I G U R A 1 1 . 5

dores del Instituto Enrico Fermi de la Universidad de Chicago.

Imagen de 48 átomos de hierro colocados en un anillo circular que "acorralan" electrones sobre una superficie de cristal de cobre, tomada con un microscopio de efecto túnel en el Almaden Laboratory de IBM en San José, California.



F I G U R A 1 1 . 6

Hidrógeno:

Un modelo simplificado del átomo

1 electrón

Aluminio:

consiste en un núcleo diminuto rodeado

en 1 capa

13 electrones

de electrones que orbitan en capas. A

en 3 capas

medida que las cargas de los núcleos

aumentan, los electrones se acercan más

y las capas se hacen más pequeñas.

Litio:

3 electrones en 2 capas

Helio:

2 electrones

en 1 capa

materia. Esta imagen, entre muchas otras, resalta la encantadora influencia recíproca entre arte y ciencia.

Dado que no es posible ver el interior de un átomo, se construyen modelos. Un modelo es una abstracción que ayuda a visualizar lo que no se puede ver y, más importante, permite realizar predicciones acerca de las porciones no vistas del mundo natural. Uno A veces un modelo es útil aun

de los primeros modelos del átomo (y el más familiar para el público en general) se pa-cuando sea incorrecto. El esco-

cés James Watt construyó una

rece al del sistema solar. Al igual que con el sistema solar, la mayor parte

del volumen máquina de vapor funcional en el

de un átomo es espacio vacío. En el centro hay un diminuto núcleo muy denso donde siglo XVIII, con base en un modelo

se concentra la mayor parte de la masa. Alrededor del núcleo hay "capas" de partículas de calor que resultó ser bastante

en órbita. Son ***electrones****, unidades básicas de la materia con carga eléctrica (los mismos incorrecto.*

electrones que constituyen la corriente eléctrica en tu iPhone). Aunque los electrones repelen eléctricamente a otros electrones, son atraídos eléctricamente hacia el núcleo, que tiene carga positiva. A medida que aumentan el tamaño y la carga de los núcleos, los electrones se acercan más, y las capas se vuelven más pequeñas. Es muy interesante que el átomo de uranio, con sus 92 electrones, no sea considerablemente más grande en diámetro que el átomo más ligero, el hidrógeno.

Este modelo se propuso por primera vez a principios del siglo XX, y refleja una comprensión más bien simplificada del átomo. Pronto se descubrió, por ejemplo, que los electrones no orbitan el centro del átomo como los planetas orbitan el Sol. Sin em-Artistas y científicos buscan

patrones en la naturaleza y des-

bargo, al igual que la mayor parte de los primeros modelos, el modelo atómico plane-cubren conexiones que siempre

tario sirvió de valioso escalón para una mejor comprensión y la elaboración de modelos han estado ahí… aunque se han

más exactos. Cualquier modelo atómico, sin importar cuán perfeccionado, no es más escapado a la mirada.

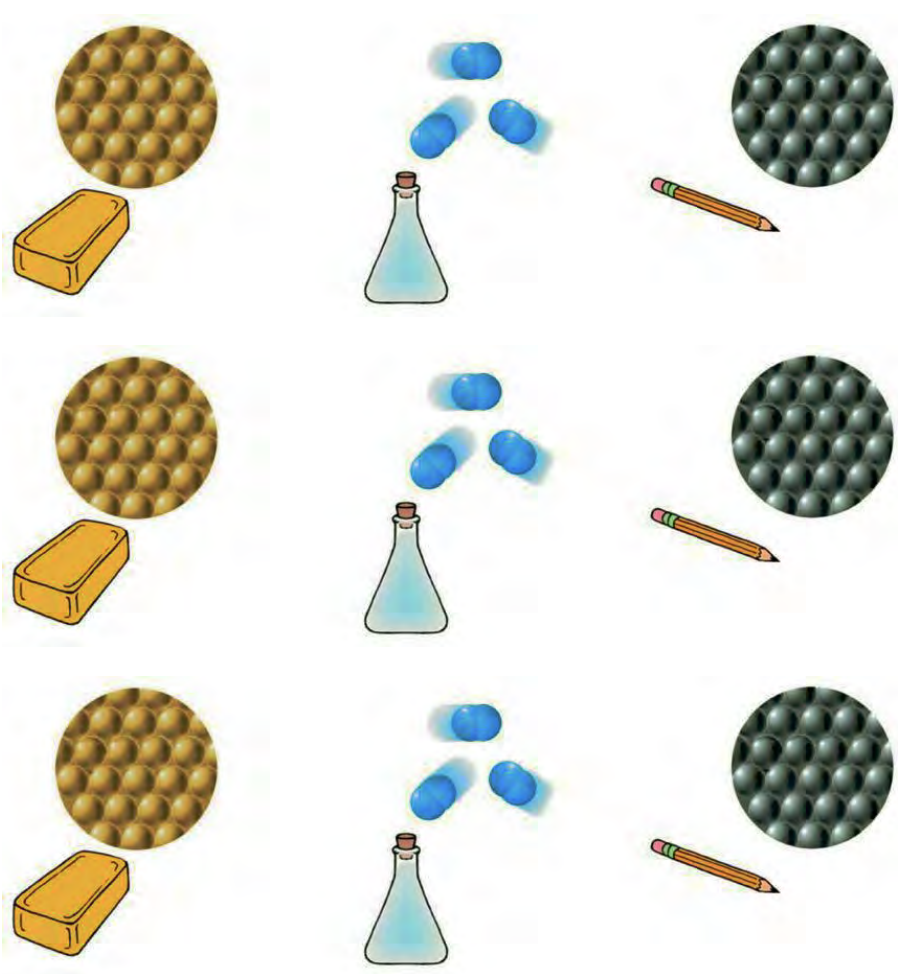
que una representación simbólica del átomo, no una imagen física del átomo real.

11.4 *Estructura atómica*

Casi toda la masa de un átomo está concentrada en el ***núcleo atómico****, que ocupa sólo algunas cuatrillonésimas de su volumen. Por tanto, el núcleo es extremadamente denso.*

Si núcleos atómicos brutos pudieran empacarse unos contra otros en una bola de 1 cm de diámetro (aproximadamente el tamaño de un gran

guisante), ¡la bola pesaría alrededor de 100,000,000 de toneladas! Enormes fuerzas eléctricas de repulsión impiden tal apretado empaquetado de núcleos atómicos porque cada núcleo está cargado eléctricamente y repele a todos los demás núcleos. Sólo bajo circunstancias especiales los núcleos de dos o más átomos se apiñan en contacto. Esto puede suceder cuando los núcleos en un laboratorio se proyectan hacia un blanco o cuando la materia se calienta a millones de grados. Una reacción nuclear ocasionada por altas temperaturas se denomina reacción de fusión termonuclear. Ocurre en los centros de las estrellas y a final de cuentas es lo que las hace brillar. (En el Capítulo 34 estudiarás estas reacciones nucleares.) El principal bloque de construcción del núcleo es el nucleón, que a su vez está compuesto de partículas fundamentales llamadas quarks. Cuando un nucleón está en un estado eléctricamente neutro, es un ***neutrón****; cuando está en un estado con carga positiva, es un* ***protón****. Todos los protones son idénticos; son copias unos de otros. Lo*



mismo ocurre con los neutrones: cada neutrón es como cualquier otro neutrón. Los núcleos más ligeros tienen aproximadamente iguales números de protones y neutrones; los núcleos más masivos tienen más neutrones que protones. Los protones tienen carga eléctrica positiva que repele otras cargas positivas, pero atrae cargas negativas. De modo que cargas iguales se repelen entre sí, y cargas distintas se atraen entre sí. Los protones positivos en el núcleo son los que atraen la nube circundante de electrones con carga negativa para constituir un átomo. (En el Capítulo 33 se describe la fuerza nuclear fuerte, que enlaza los protones con los neutrones y entre sí en el interior del núcleo.) Los elementos

Cuando una sustancia está compuesta sólo de un tipo de átomo se le llama **elemento**.

Los átomos son las partículas individuales que constituyen una sustancia. Aunque las palabras elemento y átomo con frecuencia se utilizan en un contexto similar, la diferencia es que los elementos están hechos de átomos y no de la manera contraria. Un anillo de Todas las palabras del idioma

oro puro de 24 quilates, por ejemplo, está compuesto sólo de átomos de oro. Un anillo castellano se construyen con una

de oro con menos quilates está compuesto de oro y otros elementos, como níquel. El lí-combinación de las mismas 27

quido plateado de un barómetro o termómetro es el elemento mercurio. Todo el líquido letras. De igual modo, todas las

consiste sólo en átomos de mercurio. Un átomo de un elemento particular es la muestra cosas materiales del mundo

más pequeña de dicho elemento. En consecuencia, puedes ver que, aunque las palabras están compuestas de diferentes

combinaciones de unos 100 ele-

átomo y elemento con frecuencia se usan de manera indistinta, elemento se refiere a un mentos diferentes.

tipo de sustancia (una que contiene sólo un tipo de átomo), en tanto que

átomo se refiere a las partículas individuales que constituyen dicha sustancia. Por ejemplo, se habla de aislar un átomo de mercurio de un matraz del elemento mercurio.

En todo el Universo, el hidrógeno es el elemento más ligero y abundante: más de 90% de los átomos son átomos de hidrógeno. El helio, el segundo elemento más ligero, proporciona la mayoría de los átomos restantes del Universo. Los átomos más pesados de tu alrededor fueron fabricados por la fusión de elementos ligeros en los calientes calderos de alta presión de las profundidades del interior de las estrellas. Los elementos más pesados se forman cuando estrellas enormes implosionan y luego explotan: supernovas. Casi todos los elementos sobre la Tierra son remanentes de estrellas que explotaron mucho antes de que naciera el sistema solar.

A la fecha se han identificado más de 115 elementos. De ellos, alrededor de 90 se dan en la naturaleza. Los demás se producen en el laboratorio con aceleradores atómicos de alta energía y reactores nucleares. Los elementos producidos en el laboratorio son demasiado inestables (radiactivos) para darse de manera natural en cantidades considerables. De una despensa que contiene menos de 100 elementos, se tienen los átomos que constituyen casi toda sustancia simple, compleja, viva y no viva del Universo conocido. Más de 99% del material sobre la Tierra está formado sólo de aproximadamente una docena de los elementos. Los demás elementos son relativamente raros.

Los seres humanos, por ejemplo, están compuestos principalmente de cinco elementos: oxígeno (O), carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y calcio (Ca). Las letras entre paréntesis son los símbolos químicos de dichos elementos.

Símbolo atómico

Símbolo atómico

Símbolo atómico

del oro

del nitrógeno

del carbono

F I G U R A 1 1 . 7

Cualquier elemento

Au

N

C

consiste sólo en un tipo

de átomo. El oro consta

sólo de átomos de oro,

un matraz de nitrógeno

Un átomo de oro

gaseoso consiste sólo en

Un átomo

Un átomo de nitrógeno

de carbono

átomos de nitrógeno, y

en una molécula de nitrógeno

el carbono de un lápiz de

El elemento oro

El elemento carbono

El elemento nitrógeno

grafito está compuesto

sólo de átomos de carbono.

11.5 *La tabla periódica de los elementos*

Los elementos se clasifican por el número de protones de su núcleo, es decir, su ***número*** *El mercurio, el elemento número*

80, suele encontrarse en rocas y

atómico*. El hidrógeno, que contiene un protón por átomo, tiene número atómico 1; el minerales como el cinabrio y los*

helio, con dos protones por átomo, tiene número atómico 2; y así sucesivamente hasta combustibles fósiles. El mercu-el elemento más pesado que ocurre en la naturaleza, el uranio, con número atómico 92.

rio en sí, sin perturbación, no es

Los números continúan después del número atómico 92, con los elementos transuráni-dañino. Pero cuando se machaca

cos (más allá del uranio) producidos artificialmente. El ordenamiento de los elementos el mineral o se quema carbón,

por sus números atómicos constituye la ***tabla periódica de los elementos*** *(Figura 11.9).*

se libera mercurio al aire, donde

La tabla periódica es una tabla que enlista los átomos por su número atómico y puede flotar a lo largo de cientos

también por sus arreglos eléctricos. Se parece mucho a un calendario con sus semanas de kilómetros y depositarse en los

árboles y la tierra o en las corrien-

en filas y sus días en columnas. De izquierda a derecha, cada elemento tiene átomos tes acuáticas, lagos y océanos. Ahí

con un protón y un electrón más que el elemento que le precede. Al leer hacia abajo la es donde el mercurio se vuelve

tabla, cada elemento tiene átomos con una capa más que el de arriba. Las capas interio-peligroso. Cuando se combina

res están llenas hasta su capacidad, y la capa exterior puede o no estarlo, dependiendo con carbono se convierte en

del elemento. Sólo los elementos de la extrema derecha de la tabla, donde estaría el metilmercurio, una neurotoxina

sábado en un calendario, tienen sus capas exteriores llenas hasta su capacidad. Se trata mortal. Cada año, alrededor de 75

toneladas de mercurio están en

de los gases nobles: helio, neón, argón, criptón, xenón y radón. La tabla periódica es el el carbón que se suministra a las

mapa de caminos del químico, y mucho más. La mayoría de los científicos considera plantas eléctricas estadounidenses

la tabla periódica como la más elegante tabla de organización jamás ideada. El enorme y alrededor de 23 de éste se emite al

esfuerzo humano y la ingenuidad que se utilizaron para descubrir sus regularidades aire. China se unió a esta práctica.

constituyen una fascinante historia de detectives atómicos.1

Los elementos pueden tener hasta siete capas, y cada capa puede contener un número máximo de electrones. La primera capa, y la más interna, tiene una capacidad para dos electrones y la segunda capa tiene una capacidad

para ocho electrones. El arreglo de los electrones en las capas dicta propiedades como las temperaturas de fusión y de La mayoría de los elementos de la

congelación, la conductividad eléctrica y el sabor, textura, apariencia y color de las tabla periódica se encuentran en

sustancias. Los arreglos de los electrones literalmente brindan vida y color al mundo.

los gases interestelares.

Los modelos del átomo evolucionaron con los nuevos descubrimientos. El antiguo modelo orbital del átomo dio lugar a un modelo que ve al electrón como una onda estacionaria, completamente diferente de la idea de una partícula en órbita. Éste es el modelo mecánico cuántico, introducido en la década de 1920, que es una teoría del mundo a pequeña escala que incluye las pronosticadas propiedades ondulatorias de la materia. Trata con "conglomerados" que ocurren en el nivel subatómico: conglomerados de materia o conglomerados de cosas como energía y cantidad de movimiento angular. (En el Capítulo 31 se habla más acerca del cuanto.)

Tamaños relativos de los átomos

Los diámetros de las capas electrónicas de los átomos están determinados por la cantidad de carga eléctrica del núcleo. Por ejemplo, el protón positivo del átomo de hidrógeno contiene un electrón en una órbita a cierto radio. Si se duplica la carga positiva del núcleo, el electrón en órbita será jalado hacia una órbita más apretada con la mitad de su radio anterior, dado que la atracción eléctrica se duplica. Esto ocurre con el helio, que tiene un núcleo doblemente cargado cuando atrae un solo electrón. Es interesante que si ***F I G U R A 11 . 8***

se agrega un segundo electrón no sea jalado tanto porque el primer electrón compensa Tanto tú como Leslie están hechos de en parte la atracción del núcleo doblemente cargado. Éste es un átomo de helio neutro, polvo de estrellas, en el sentido de que que es un poco más pequeño que un átomo de hidrógeno.

el carbono, el oxígeno, el nitrógeno y los

demás átomos que constituyen tu cuer-

Un átomo con carga eléctrica desequilibrada (por ejemplo, un núcleo con más po se originaron en las profundidades de carga positiva que las cargas negativas circundantes) se le denomina ***ión****. Un ión es antiguas estrellas*

que explotaron hace un átomo cargado. Un átomo de helio que contiene sólo un electrón, por ejemplo, mucho tiempo.

1La tabla periódica se atribuye al químico ruso profesor Dmitri Mendeléyev (1834-1907), quien, de forma más importante, utilizó la tabla para predecir la existencia de elementos no conocidos en ese entonces. Mendeléyev fue un profesor muy querido y dedicado cuyos salones de clase estaban llenos de estudiantes que querían escucharlo. Fue tanto un gran profesor como un gran científico. El elemento 101 se nombró en su honor.

PA R T E D OS

P RO P I EDA D ES D E L A M AT ER I A

8

3

18

2

10

18

ás

Helio

4.003

Neón

Ar

36

Argón

Kr

83.8

54

Xe

1.29

86

71

He

Ne

20.180

39.948

Xenón

Rn

Kriptón

13

Radón

(222)

11

Lu

10

Lr

(262)

Uuo

Lutecio

174.967

Lawrencio

sotópica

)

7

2

nteros m

9

17

***F** Flúor*

17

Cl

35

Cloro

Br

I

53

Yodo

85

18.998

35.453

Bromo

At

70

(210

79.904

Ástato

11

Yb

126.905

Uus

Iterbio

10

173.04

No

(259)

Nobelio

ros e

bundancia i úme

or a

16

8

O

16

S

34

Azufre

Se

52

78.96

Te

6

84

Po

(209)

11

Lv

293

69

os n

Oxígeno 15.999

32.066

Selenio

Telurio

127.60

Polonio

***Tm** Tulio*

101

168.934

Md

(258)

Livermorio

Mendelevio

diada p on l

7

5

0

7

15

N

15

P

33

As

51

Sb

1.76

83

Bi

11

68

Er *Erbio*

10

14.00

Fósforo

30.974

74.922

12

rome

Arsénico

Uup

167.26

Fm

(257)

Fermio

Bismuto

208.980

Nitrógeno

Antimonio

a p aréntesis s

1

6

11

14

14

Si

1

4

32

tómic ntre p

12.0

Silicio

Ge

50

72.6

Sn

82

28.086

Estaño

118.7

Pb

7.2

11

Fl

289

67

Plomo

20

Ho

99

Es

(252)

Carbono

Flerovio

Holmio

164.93

Germanio

Einstenio

asa am

1

a

3

1)

5

uestran e

13

BC

.81

s l

Boro

13

Al

31

10

Ga

49

Galio

In

81

Indio

Tl *Talio*

11

66

26.982

69.723

114.82

Aluminio

204.383

Uut

Dy

98

162.5

Cf

(25

Disprosio

Californio

e m

bajo e ue s

11

s q

12

30

Zn

2

stá a

Cinc

48

65.39

Cd

80

11

Cn

65

Hg

(285)

Tb

97

Cadmio

112.4

200.59

Terbio

Bk

(247)

Mercurio

Copernicio

158.925

Berkelio

ue e

ro q adiactivo

11

29

Cu

47

Cobre

63.546

Ag *Plata*

79

Oro

111

Rg

64

Au

(272)

Gd

96

Cm *Curio (247)*

107.868

196.967

úme

Roentgenio

Gadolinio

157.25

l n ntos r

leme

10

28

Ni

46

o, y e

Níquel

Pd

78

58.69

Pt

0

1)

11

Ds

63

(27

Eu

1.964

95

Paladio

106.42

Platino

195.08

Europio

Am

(243)

15

Americio

os e

Darmstadtio

tómic e l

Grupo

9

9

ero a

27

Co

45

Rh

77

Ir

62

icas d

Rodio

10

58.933

Mt

Sm

94

Pu

(244)

102.906

192.22

(268)

Cobalto

Iridio

Samario

150.36

Plutonio

Meitnerio

l núm tóm

s e

.07

8

asas a

26

Fe

44

Hierro

Ru

76

Os *Osmio*

10

Hs

61

55.845

Rutenio

101

190.23

Hassio

(269)

Pm

93

(145)

Np

237.05

ico e

Prometeio

Neptunio

as m

uím

7

29

a). L

78

25

43

Tc

(98)

75

Re *Renio*

107

Bh

60

Mn

54.938

Bohrio

(264)

Nd

92

U

um

Tecnecio

186.20

bolo q

Neodimio

144.24

Uranio 238.0

Manganeso

ím ica (

el s

6

tóm

6

24

Cr

42

74

Cromo

95.94

W

10

Sg

59

(266)

Pr

91

51.996

Mo

Pa

1.036

183.84

140.908

23

Molibdeno

Tungsteno

Seaborgio

Praseodimio

Protactinio

rriba d asa a

Metal

Metaloide

No metal

e m

5

15

stá a

5

23

V

41

73

Ta

Niobio

10

Db

58

Vanadio

50.942

Nb

(262)

Ce

90

Cerio

Th *Torio*

92.906

Tántalo

180.948

Dubnio

140.1

232.038

ue e

nto.

ro q nidades d

4

leme

1)

n u

22

Ti

40

úme

Titanio

47.88

Zr

72

Hf *Hafnio*

10

Rf

91.224

Circonio

178.49

(26

l n

Rutherfordio

icho e

Actínidos

e d

28

Lantánidos

34

ntos. E xpresada e

21

Sc

39

Y *Itrio*

57

La

89

Ac

44.956

88.906

Escandio

Lantano

138.906

Actinio

227.0

leme

stable d

os e ierra y e

25

ás e

21

4

Be

12

78

12

e l a T

Berilio

Mg

20

Ca

38

Calcio

Sr

56

87.62

Ba

88

9.0

Bario

Ra

24.305

40.0

137.327

Radio

Estroncio

226.0

Magnesio

.9

e l

11

sótopo ml i

1

H

79

3

Li

1

A

eriódica d

Litio

11

Na

19

K

erficie d

Sodio

37

6.94

Rb

55

Cs

87

Fr

1.00

22.990

Potasio

39.098

Rubidio

85.468

Cesio

(223)

132.905

Francio

Hidrógeno

UR

up

abla p a s

1

2

3

4

5

6

7

IG

P er iodo

F

La t en l cercanos a

GRUPOS

F I G U R A 1 1 . 1 0

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

Los tamaños de los átomos disminuyen

gradualmente de izquierda a derecha a

1

través de la tabla periódica (aquí sólo se

H

He

muestran los primeros cinco periodos).

2

Li

Be

B

C

N

O

F

Ne

3

PERIODOS

Na Mg

Al

Si

P

S

Cl

Ar

4

K

Ca Sc

Ti

V

Cr Mn Fe Co Ni Cu Zn Ga Ge As Se

Br

Kr

5

Rb Sr

Y

Zr Nb Mo Tc Ru Rh Pd Ag Cd

In

Sn Sb

Te

I

Xe

es un ión helio. Se dice que es un ión positivo porque tiene más carga positiva que carga negativa.

De modo que dos electrones alrededor de un núcleo doblemente cargado adoptan una configuración característica del helio. Dos electrones que rodean un núcleo de helio ***SCREENCAST: Tabla periódica***

constituyen un átomo neutro. Un tercer protón en un núcleo atómico puede jalar dos electrones hacia una órbita todavía más cerrada y, más aún, contener un tercer electrón en una órbita un poco más grande. Éste es el átomo de litio, número atómico 3. Puedes continuar con este proceso y aumentar la carga positiva del núcleo y agregar sucesivamente más electrones y más órbitas hasta llegar a números atómicos mayores que 100, a los elementos radiactivos "sintéticos".2

A medida que la carga nuclear aumenta y se agregan más electrones en las órbitas exteriores, las órbitas internas se encogen de tamaño debido a la mayor atracción nuclear. Esto significa que los elementos más pesados no son más grandes en diámetro que los elementos más ligeros. El diámetro del átomo de xenón, por ejemplo, sólo tiene aproximadamente cuatro diámetros de helio, aun cuando es casi 33 veces más masivo.

Los tamaños relativos de los átomos de la Figura 11.10 están aproximadamente a la misma escala.

2 He

5

13

3

B

Al

8

9

10

Li

14

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

15

Si

O 16 F

Ne

17

18

1 1

P

S

Ar

31

Cl

H

11 4 B

Na e

Ga 32

34

36

19

Ge 33

Se

Kr

28

29

30

As

35 Br

27

K

49

25

26

Ni

Cu

Zn

In

50

54

20

24

21

23

22

Mn

Fe

Co

51

52

53

Ti

V

Cr

48

Sn

Te

Xe

37

Ca

Sc

47

Sb

I

45

Rb

46

81

44

86

38

42

43

Pd

Ag

Cd

82

83

84

85

55

Sr 39

41

40

Ru

Rh

Tl

Cs

Y

Zr

Nb

Mo

Tc

Pb

80

Bi

Po

At

Rn

79

56

*57**

78

76

Pt

Au

Hg

87

Ba

La

77

75

74

72

73

Os

Ir

Fr

W

Re

Hf

Ta

Ra

112

111

110

109

70

108

Ds

Rg

Cn

69

71

107

Mt

68

106

Hs

67

66

105

104

Sg

Bh

65

64

*89***

Rf

Db

63

62

Ac

61

60

59

Ce

Pr

Nd

Pm

Sm

Eu

Gd

Td

Dy

Ho

Er

Tm

Yb

Lu

58

F I G U R A 1 1 . 1 1

Esta tabla muestra los tamaños atómicos

103

102

101

relativos, indicados por altura. Observa

100

99

98

97

que el tamaño atómico generalmente

Cf

Es

Fm

Md

No

Lr

96

95

94

93

disminuye a medida que te mueves hacia

92

91

la esquina superior derecha de la tabla

Th

Pa

U

Np

Pu

Am

Cm

Bk

90

periódica.

2Cada órbita puede contener sólo algunos electrones. Los números de los primeros cuatro periodos son 2, 8, 8, 18.

218

PA R T E D OS

P RO P I EDA D ES D E L A M AT ER I A

P U N T O D E C O N T R O L

¿Qué fuerza fundamental dicta el tamaño de un átomo?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

La fuerza eléctrica.

***11.6** Isótopos*

Mientras que el número de protones de un núcleo coincide exactamente con el número No confundas un isótopo con

de electrones alrededor del núcleo en un átomo neutro, el número de protones del nú-un ión, que es un átomo que

está eléctricamente cargado por

cleo no necesariamente coincide con el número de neutrones. Por ejemplo, la mayoría de un exceso o una deficiencia de

los núcleos de hierro con 26 protones contiene 30 neutrones, mientras que

un pequeño electrones.

porcentaje contiene 29 neutrones. Los átomos del mismo elemento que tienen diferentes números de neutrones se llaman ***isótopos*** *del elemento. Los átomos neutros de los diversos isótopos de un elemento dado tienen todos el mismo número de electrones y el mismo número de protones. En su mayor parte, se comportan de manera idéntica. (En el Capítulo 33 se regresará a los isótopos.)*

Los isótopos se identifican por su número de masa, que es el número total de protones y neutrones (en otras palabras, el número de nucleones) en el núcleo. Un isótopo de hidró -

No confundas número de masa

geno que tiene un protón y ningún neutrón, por ejemplo, tiene un número de masa de con masa atómica. El número de

1 y se le conoce como hidrógeno-1. Del mismo modo, un átomo de hierro con 26 pro-masa es un entero que especifica

tones y 30 neutrones tiene un número de masa de 56 y se le conoce como hierro-56. Un un isótopo y no tiene unidades: es

simplemente el número de nucleo-

átomo de hierro con 26 protones y sólo 29 neutrones se designa como hierro-55.

nes en un núcleo. La masa atómica

La masa total de un átomo se denomina masa atómica. Ésta es la suma de las ma-es un promedio de las masas de

sas de todos los componentes del átomo (electrones, protones y neutrones). Puesto que los isótopos de un elemento dado,

los electrones son mucho menos masivos que los protones y neutrones, su aportación a expresada en unidades de masa

la masa atómica es despreciable. Los átomos son tan pequeños que expresar sus masas atómica (uma).

en unidades de gramos o kilogramos no es práctico. En vez de el o, los científicos usan una unidad de masa especialmente definida conocida como ***unidad de masa atómica*** *o* ***uma****. Un nucleón tiene una masa de aproximadamente 1 uma. La uma se define como exactamente 1/12 de la*

masa de un átomo de

carbono-12. La tabla periódica menciona las

+

+

+

+

+

+

+

+

masas atómicas en unidades de uma.

+ + + +

+ + ++

+

+

La mayoría de los elementos tienen varios

+

+

+

+ ++

+ ++

isótopos. La masa atómica de cada elemento

Hidrógeno-1

Hidrógeno-2 Hidrógeno-3

Hierro-56

Hierro-55

mencionado en la tabla periódica es el prome-

1 protón

1 protón

1 protón

26 protones

26 protones

0 neutrones

1 neutrón

2 neutrones

dio ponderado de las masas de dichos isótopos

30 neutrones

29 neutrones

(protio)

(deuterio)

(tritio)

con base en la ocurrencia de cada isótopo so-

bre la Tierra. Por ejemplo, aunque el isótopo

Isótopos del hidrógeno

Isótopos del hierro

predominante del carbono contiene seis proto-

F I G U R A 1 1 . 1 2

nes y seis neutrones, alrededor de 1% de todos

Los isótopos de un elemento tienen

los átomos de carbono contienen siete neutrones. El isótopo más pesado eleva la masa el mismo número de protones, pero

atómica promedio del carbono de 12.000 uma a 12.011 uma.

diferentes números de neutrones y en

consecuencia diferentes números de

masa. Los tres isótopos del hidrógeno

tienen nombres especiales: protio para el

P U N T O D E C O N T R O L

hidrógeno-1, deuterio para el hidróge-

no-2 y tritio para el hidrógeno-3. De

1. ¿Cuáles contribuyen más a la masa de un átomo: los electrones o los pro-estos tres isótopos, el hidrógeno-1 es el

tones? ¿Cuáles contribuyen más al volumen de un átomo (su tamaño)?

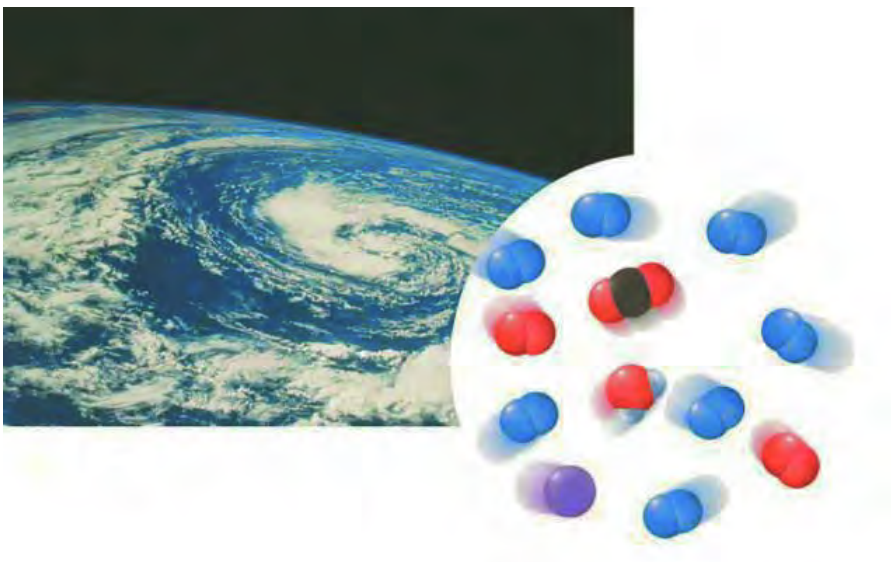
más común. Para la mayoría de los ele-

2. ¿Cuál se representa mediante un número entero: el número de masa o la mentos, como el hierro, los isótopos no

tienen nombres especiales y se indican

masa atómica?

simplemente por el número de masa.



3. ¿Los dos isótopos del hierro tienen el mismo número atómico? ¿El mismo número de masa atómica?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. Los protones contribuyen más a la masa de un átomo; los electrones contribuyen más a su tamaño.

2. El número de masa siempre está dado como un número entero, como hidrógeno-1 o carbono-12. La masa atómica, por el contrario, es la masa promedio de los varios isótopos de un elemento y, por

tanto, se representa con un número fraccional.

3. Los dos isótopos del hierro tienen el mismo número atómico 26, porque cada uno tiene 26 protones en el núcleo. Tienen diferentes números de masa atómica si tienen diferentes números de neutrones en el núcleo.

11.7 Compuestos y mezclas

Cuando átomos de diferentes elementos se enlazan entre sí, forman un compuesto. Los ejemplos de compuestos simples incluyen agua, amoniaco y metano. Un compuesto es unívocamente diferente a los elementos de los cuales está constituido, y sólo puede separarse en sus elementos constituyentes por medios químicos. El sodio, por ejemplo, es un metal que reacciona violentamente con el agua. El cloro es un gas amarillo-verdoso venenoso. Sin embargo, el compuesto de estos dos elementos es el cristal blanco relativamente inofensivo (NaCl) que espolvoreas en tus papas. Considera también que, a temperaturas ordinarias, los elementos hidrógeno y oxígeno son ambos gases. Cuando se combinan, forman el compuesto agua (H2O), un líquido… bastante diferente.

No todas las sustancias reaccionan químicamente unas con otras cuando se juntan.

Una sustancia que se mezcla sin enlace químico se llama mezcla. La arena combinada con sal es una mezcla. Los gases hidrógeno y oxígeno forman una mezcla hasta que enciende, con lo que forman el compuesto agua. Una mezcla común de la que todos dependen es la de nitrógeno y oxígeno juntos con un poco de argón y pequeñas cantidades de dióxido de carbono y otros gases. Es el aire que respiras.

F I G U R A 1 1 . 1 3

La atmósfera de la Tierra es una mezcla

de elementos y compuestos gaseosos.

Aquí se muestran algunos de ellos.

Dióxido de carbono

Nitrógeno

Agua

Composición

Componente

porcentual

Oxígeno

Nitrógeno, N

Argón

2

78%

Oxígeno, O2

21%

Argón, Ar

0.9%

Agua, H2O

0-4% (variable)

Dióxido de carbono, CO2

0.034% (variable)

P U N T O D E C O N T R O L

¿La sal de mesa común es un elemento, un compuesto o una mezcla?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

La sal no es un elemento; si lo fuera, la verías mencionada en la tabla periódica. La sal de mesa pura es un compuesto de los elementos sodio y cloro, representados en la Figura 11.14. Observa que los átomos de sodio (verde) y los átomos de cloro (amarillo) están ordenados en un patrón tridimensional repetitivo: un cristal. Cada átomo F I G U R A 1 1 . 1 4

de sodio está rodeado por seis átomos de cloro, y cada átomo de cloro está rodeado La sal de mesa (NaCl) es un compuesto

por seis átomos de sodio. Es interesante que no haya grupos sodio-cloro indepen-cristalino que no está hecho de molécu-

dientes que puedan etiquetarse como moléculas.3

las. Los átomos de sodio (verde) y de

cloro (amarillo) forman un cristal.

11.8 Moléculas

Una molécula es la partícula más pequeña de sustancia que consiste en dos o más átomos que se enlazan mediante compartición de electrones. (Se dice que tales átomos tienen enlaces covalentes.) Una molécula puede ser tan simple como la combinación de dos átomos

de oxígeno, O2, o la combinación de dos átomos de nitrógeno, N2, que son los elementos que constituyen la mayor parte del aire que respiras. Dos átomos de hidrógeno se combinan con un solo átomo de oxígeno para formar una molécula de agua, H2O. Modificar una molécula con un átomo puede representar una gran diferencia.

Si sustituyes el átomo de oxígeno por un átomo de azufre, produces ácido sulfhídrico, H2S, un gas tóxico de olor fuerte.

O

H

H

H

F I G U R A 1 1 . 1 5

H

H

H

Modelos de moléculas simples: O

O

N

2,

C

NH3, CH4 y H2O. Los átomos de una

H

O

molécula no sólo se mezclan, sino que se

H

H

unen de una manera bien definida.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Cuántos núcleos atómicos hay en un solo átomo de oxígeno? ¿En una sola molécula de oxígeno?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

En un átomo de oxígeno hay un núcleo, O, y dos en la combinación de dos átomos de oxígeno: una molécula de oxígeno, O2.

Aunque el H2O es el principal

gas de efecto invernadero en la

atmósfera, el CO2, el segundo

Para separar las moléculas se necesita energía. A fin de entender esto puedes pensar gas de efecto invernadero más

predominante, es notorio porque

en un par de imanes pegados. Así como se necesita cierta "energía muscular" para su mayor abundancia se atribuye a

separar los imanes, el rompimiento de las moléculas necesita energía. Durante la fo-la actividad humana. Dado que si

tosíntesis, las plantas utilizan la energía de la luz solar para romper los enlaces dentro continúa el calentamiento por CO2

del dióxido de carbono atmosférico y el agua para producir gas oxígeno y moléculas de se puede desencadenar más H2O,

carbohidratos. Dichas moléculas de carbohidratos retienen esta energía solar hasta que una preocupación actual es la

creciente cantidad de ambos gases

el proceso se invierte: la planta se oxida, ya sea en forma lenta al pudrirse o rápida al en la atmósfera.

3En sentido estricto, la sal de mesa común es una mezcla, a menudo con pequeñas cantidades de yoduro de potasio y azúcar. El yodo del yoduro de potasio virtualmente ha erradicado una enfermedad frecuente de tiempos antiguos, una inflamación de la glándula tiroides conocida como bocio endémico. Pequeñas cantidades de azúcar evitan la oxidación de la sal, que de otro modo se tornaría

amarilla.

C A PÍ T U LO 11 L A N AT U R A L E Z A ATÓ M I C A D E L A M AT ER I A 221

quemarse. Entonces la energía proveniente de la luz solar se libera de vuelta al ambiente. ¡De modo que el lento calentamiento de la composta en descomposición o el rápido calentamiento de una fogata en realidad es el calentamiento de la luz solar almacenada!

Más cosas pueden quemarse además de las que contienen carbono e hidrógeno. El La discriminación olfativa del

hierro también se "quema" (se oxida). Eso es lo que es la formación de herrumbre: la len-salmón se ha medido en partes

ta combinación de átomos de oxígeno con átomos de hierro, que libera energía. Cuando por billón —bastante increíble—.

Cuando llega la época de regresar

la oxidación del hierro se acelera, constituye agradables paquetes calentadores de manos del océano a su hábitat original, los

para esquiadores y excursionistas invernales. Cualquier proceso en el que los átomos se salmones siguen su olfato. Nadan

reordenen para formar diferentes moléculas se llama reacción química.

en una dirección donde las con-

El sentido del olfato humano es sensible a cantidades excesivamente pequeñas de centraciones de aguas conocidas

se vuelven mayores. Con el tiempo

moléculas. Tus órganos olfatorios detectan con facilidad pequeñas concentraciones encuentran la fuente de esa agua

de gases nocivos como el ácido sulfhídrico (la sustancia que huele como a huevos donde pasaron los primeros dos

podridos), el amoniaco y el éter. El olor del perfume es causado por moléculas que se años de sus vidas.

evaporan rápidamente y se difunden de manera aleatoria en el aire

hasta que algunas de ellas se acercan lo suficiente a tu nariz para ser inhaladas. Sólo son unas cuantas de las miles de millones de moléculas que, en sus deambulaciones sin dirección, terminan en tu nariz. Puedes tener una idea de la rapidez de la difusión molecular en el aire cuando estás en tu recámara y percibes el olor a comida poco después de que la puerta del horno se abre en la cocina.

11.9 Antimateria

Mientras que la materia está compuesta de átomos con núcleos cargados positivamente y electrones cargados negativamente, la antimateria está compuesta de átomos con núcleos negativos y electrones positivos, o positrones.

Los positrones se descubrieron por primera vez en 1932, en los rayos cósmicos que bombardean la atmósfera de la Tierra. En la actualidad, antipartículas de todo tipo se producen regularmente en laboratorios con el uso de grandes aceleradores nucleares.

Un positrón tiene la misma masa que un electrón y la misma magnitud de carga, pero el signo opuesto. Los antiprotones tienen la misma masa que los protones, pero con carga negativa. El primer antiátomo artificial completo, un positrón que orbitaba un antiprotón, se construyó en 1995. Toda partícula cargada tiene una antipartícula de la misma masa y carga opuesta. Las partículas neutras (como el neutrón) también tienen antipartículas, que son iguales en masa y en algunas otras propiedades, pero opuestas en otras propiedades determinadas. Toda partícula tiene una antipartícula. Incluso existen antiquarks.

La fuerza gravitacional no distingue entre materia y antimateria: cada una atrae a F I G U R A 11 .1 6

la otra. Además, no hay forma de indicar si algo está hecho de materia o de antimate - Un átomo de antimateria tiene un ria por la luz que emite. Sólo con efectos nucleares mucho más sutiles y difíciles de núcleo con carga negativa rodeado por positrones.

medir podría determinarse si una galaxia distante está hecha de materia o de antimateria. Pero, si una antiestrella encontrase una estrella, sería otra historia. Se aniquila-rían entre sí, y la mayor parte de la materia se convertiría en energía radiante (esto es lo que ocurrió con el antiátomo creado en 1995, cuando encontró materia normal y rápidamente se aniquiló en una explosión de energía). Este proceso, más que cualquier otro conocido, resulta en la máxima

producción de energía por gramo de sustancia: E 5 mc 2, con un 100% de conversión de masa.4 (La fisión y fusión nucleares, por el Puedo vivir con duda e incertidum-contrario, convierten menos de 1% de la materia involucrada.)

bre y no saber. Creo que es mucho

más interesante vivir sin saber que

En el entorno inmediato no puede haber materia y antimateria, al menos no en tener respuestas que puedan estar

cantidades apreciables o durante tiempos considerables. Es por eso que algo hecho equivocadas.— Richard Feynman

de antimateria se transformaría por completo en energía radiante en cuanto tocara materia, y consumiría una cantidad igual de materia normal en el proceso. Si la Luna 4Algunos físicos especulan que, justo después del Big Bang, el Universo temprano tenía miles de millones de veces más partículas de las que hay ahora, y que una extinción casi total de materia y antimateria causada por su aniquilación recíproca dejó sólo la cantidad relativamente pequeña de materia ahora presente en el Universo.

estuviera hecha de antimateria, por ejemplo, un destello de radiación energética sur-giría en cuanto una nave espacial la tocara. Tanto la nave espacial como una cantidad igual de la Luna de antimateria desaparecerían en una explosión de energía radiante.

Se sabe que la Luna no es de antimateria porque esto no ocurrió

durante las misiones lunares. (En realidad, los astronautas no corrieron este tipo de peligro porque había evidencia que demostraba que la Luna estaba hecha de materia ordinaria.) Pero, ¿qué hay de otras galaxias? Hay fuertes razones para creer que, en la parte de Universo conocido (el "Universo observable"), las galaxias están hechas sólo de materia normal, además de las ocasionales antipartículas transitorias. Pero, ¿qué hay del Universo más allá? ¿O de otros universos? No se sabe.

La ciencia es una manera de

enseñar a conocer algo, qué no se

conoce, en qué medida se conocen

las cosas (porque nada se conoce

P U N T O D E C O N T R O L

de manera absoluta), cómo mane-

Si un cuerpo de antimateria de 1 gramo encuentra un cuerpo de materia de jar la duda y la incertidumbre,

10 gramos, ¿qué masa sobrevive?

cuáles son las reglas de evidencia,

cómo pensar acerca de las cosas

de modo que puedan formularse

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

juicios, y cómo distinguir la verdad

del fraude y del espectáculo.

Nueve gramos de materia sobreviven (los otros 2 gramos se transforman en energía

— Richard Feynman

radiante).

Materia oscura

Se sabe que los elementos de la tabla periódica no están confinados al planeta Tierra.

A partir de estudios de radiación proveniente de otras partes del Universo, se descubrió que las estrellas y otros objetos "ahí afuera" están compuestos de las mismas partículas que hay en la Tierra. Las estrellas emiten luz con las mismas "huellas digitales"

(espectros atómicos; véase el Capítulo 30) que los elementos de la tabla periódica. Cuán maravilloso es descubrir que las leyes que gobiernan la materia en la Tierra se extienden a todo el Universo observable. Sin embargo, todavía existe un detalle problemá-tico: las fuerzas gravitacionales dentro de las galaxias se miden como mucho mayores de lo que se puede explicar con la materia visible.

Los astrofísicos hablan de materia oscura: materia que no se puede ver y que jala de Encontrar la naturaleza de la

las estrellas y galaxias que se pueden ver. En los últimos años del siglo XX, los astrofí-materia oscura y la naturaleza de

sicos confirmaron que alrededor de 23% de la materia en el Universo está compuesta la energía del espacio vacío son

de la materia oscura nunca vista. Cualquier cosa que sea la materia oscura, la mayor búsquedas de alta prioridad en

parte o toda ella es probable que sea materia "exótica", muy diferente de los elementos estos tiempos. Lo que se aprenderá hacia el 2050 probablemente

que constituyen la tabla periódica y diferente de cualquier extensión de la lista actual empequeñecerá todo lo que se ha

de elementos. Gran parte del resto del Universo es energía oscura, que empuja hacia conocido jamás.

afuera sobre el Universo en expansión. Tanto la materia oscura como la energía oscura constituyen aproximadamente 96% del Universo. Al momento de escribir esto, la naturaleza exacta de la materia oscura y de la energía oscura sigue siendo un misterio. Las especulaciones abundan y las búsquedas continúan. Sólo es cuestión de esperar y ver.

Richard Feynman solía mover la cabeza y decir que no sabía nada. Cuando él y otros grandes físicos dicen que no saben nada, quieren

decir que lo que sí saben está más cerca de la nada que de lo que pueden saber. Los científicos saben suficiente para darse cuenta de que tienen un puñado relativamente pequeño de un enorme Universo todavía lleno de misterios. Desde un punto de vista retrospectivo, los científicos de hoy saben muchísimo más que sus predecesores de hace un siglo, y los científicos entonces sabían mucho más que sus predecesores. Pero, desde el lugar privilegiado actual, al mirar hacia adelante, todavía hay tanto por aprender. El físico John A.

Wheeler, consejero de posgrado de Feynman, vislumbró que el siguiente nivel de la física dejaría atrás el cómo y se ocuparía del por qué: el significado. Apenas se ha ara-ñado la superficie.

C A PÍ T U LO 11 R E V ISI Ó N

223

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)

Átomo. La partícula más pequeña de un elemento que tiene

todas las propiedades químicas del elemento.

Ión. Átomo con carga eléctrica; un átomo con exceso o

deficiencia de electrones.

Movimiento browniano. Movimiento azaroso de pequeñas

partículas suspendidas en un gas o un líquido que resulta

de su bombardeo por los átomos o moléculas de rápido

movimiento del gas o líquido.

Isótopos. Átomos del mismo elemento que contienen diferentes

números de neutrones.

Unidad de masa atómica (uma). Unidad estándar de masa

atómica, que es igual a 1/12 la masa del átomo más

común de carbono. Una uma tiene una masa de

dentro de un átomo.

Electrón. Partícula con carga negativa que gira rápidamente

1.661 3 10227 kg.

Núcleo atómico. Centro de un átomo, que consiste en dos

Compuesto. Material en el que átomos de diferentes elementos
partículas subatómicas básicas: protones y neutrones.

están enlazados químicamente unos con otros.

Neutrón. Partícula eléctricamente neutra en el núcleo de un

Mezcla. Sustancia cuyos componentes están mezclados sin

átomo.

combinarse químicamente.

Protón. Partícula con carga positiva en el núcleo de un átomo.

Molécula. Dos o más átomos que se enlazan mediante una

Elemento. Sustancia pura que consiste sólo en un tipo de átomo.

compartición de electrones. Los átomos se combinan

Número atómico. Número que designa la identidad de un

para convertirse en moléculas.

elemento, que es el número de protones en el núcleo de un

Antimateria. Forma “complementaria” de materia compuesta

átomo; en un átomo neutro, el número atómico también es

de átomos que tienen núcleos negativos y electrones

el número de electrones en el átomo.

positivos.

Tabla periódica de los elementos. Tabla que menciona los

Materia oscura. Materia no vista y no identificada que es

elementos en filas horizontales por su número atómico

evidente por su tirón gravitacional sobre las estrel as en las

y en columnas verticales por sus arreglos electrónicos y

galaxias. La materia oscura, junto con la energía oscura,

propiedades químicas similares. (Consulta la Figura 11.9.)

constituyen tal vez 96% de la materia del Universo.

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N) 11.1 La hipótesis atómica

12. Dado que los átomos son principalmente espacio vacío,

1. ¿Quién promovió la idea de los átomos a comienzos del

¿por qué no caes a través del piso donde estás parado?

siglo XIX?

13. ¿Cuál es el elemento más ligero de todos?

2. ¿Qué hace que las partículas de polvo y los pequeños

14. ¿Cuál es el elemento más abundante en el Universo conocido?

granos de hollín se muevan con movimiento browniano?

15. ¿Cómo se formaron los elementos con núcleos más

3. ¿Quién explicó primero el movimiento browniano y

pesados que los del hidrógeno y el helio?

proporcionó una explicación convincente de la existencia

16. ¿Dónde se originaron los elementos más pesados?

de los átomos?

17. ¿Cuáles son los cinco elementos más comunes en los seres

11.2 Características de los átomos

humanos?

4. ¿Cómo se compara el número aproximado de átomos en

11.5 La tabla periódica de los elementos

el aire de tus pulmones con el número de bocanadas de

18. ¿Qué te dice el número atómico de un elemento acerca

aire en la atmósfera de la Tierra?

del elemento?

5. ¿La mayoría de los átomos a tu alrededor son más jóvenes

19. ¿Cuántas capas se representan en la tabla periódica

o más viejos que el Sol?

conocida en la actualidad?

11.3 Imágenes atómicas

20. ¿Qué tipo de atracción acerca a los electrones al núcleo

6. ¿Por qué los átomos no pueden verse con un poderoso

atómico?

microscopio óptico?

21. ¿Por qué los elementos más pesados no son mucho más

7. ¿Por qué los átomos pueden verse con un haz de electrones?

grandes que los elementos más ligeros?

8. ¿Cuál es el propósito de un modelo en la ciencia?

11.6 Isótopos

11.4 Estructura atómica

22. ¿Cómo difiere un isótopo de otro?

9. ¿Dónde en el átomo se concentra la mayor parte de su masa?

23. Distingue entre el número de masa y la masa atómica.

10. ¿Qué se entiende por el término nucleón?

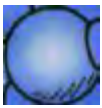
11.7 Compuestos y mezclas

11. ¿Cómo se compara la carga eléctrica de un protón con la

24. ¿Qué es un compuesto? Cita dos ejemplos.

carga eléctrica de un electrón?

25. ¿Qué es una mezcla? Cita dos ejemplos.



224

PA R T E D OS

P RO P I EDA D ES D E L A M AT ER I A

11.8 Moléculas

11.9 Antimateria

26. ¿Cómo difiere una molécula de un átomo?

28. ¿Cómo difieren materia y antimateria?

27. Comparada con la energía necesaria para separar oxígeno

29. ¿Qué ocurre cuando se encuentran una partícula de

e hidrógeno del agua, ¿cuánta energía se libera cuando se

materia y una partícula de antimateria?

recombinan?

30. ¿Cuál es la evidencia de que existe la materia oscura?

P I E N S A Y R E A L I Z A (A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 31. Una vela arderá sólo si hay oxígeno presente. ¿Una vela

32. Escribe una carta a tus abuelos donde describas cuánto

arderá el doble de tiempo en un frasco de litro invertido,

tiempo han estado presentes los átomos que constituyen

comparado con un frasco de medio litro invertido?

sus cuerpos. Y cuánto tiempo seguirán presentes.

Pruébalo y observa.

P I E N S A Y C L A S I F I C A (A N Á L I S I S)

33. Considera los siguientes átomos: A. oro, B. cobre,

34. Clasifica el número de capas en estos átomos de gas

C. carbono y D. plata.

noble, de mayor a menor:

Consulta la tabla periódica y clasifica estos átomos,

a. Argón b. Radón c. Helio d. Neón

de mayor a menor, por su

35. Clasifica las masas de estas moléculas, de mayor a menor.

a. masa.

b. número de electrones.

H

H

H

O

H

H

O H

C

N

c. número de protones.

O

H

H

H

A

B

C

D

P I E N S A Y E X P L I C A (S Í N T E S I S)

36. ¿Cuántos tipos de átomos esperas encontrar en una muestra pura de cualquier elemento?

37. ¿Cuántos átomos individuales hay en una molécula de agua? cuál es su número atómico?

38. Cuando un contenedor de gas se calienta, ¿esperarías que sus moléculas aceleren, frenen o no sean afectadas?

39. La rapidez promedio de una molécula de vapor de per-

46. Un átomo particular contiene 29 electrones, 34 neutrones y 29 protones. ¿Cuál es la identidad de este elemento y cuál es su número atómico?

47. Si dos protones y dos neutrones se quitan del núcleo de un átomo de oxígeno, ¿qué núcleo permanece?

48. ¿Qué elemento resulta si agregas un par de protones al

fume a temperatura ambiente puede ser de aproximada-

núcleo de mercurio? (Consulta la tabla periódica.)

mente 300 m/s, pero descubrirás que la rapidez a la que la

49. ¿Qué elemento resulta si dos protones y dos neutrones se

esencia viaja por la habitación es mucho menor. ¿Por qué?

expulsan de un núcleo de radio?

40. ¿Cuál de los siguientes no es un elemento: hidrógeno,

50. Para convertirse en un ión negativo, ¿un átomo pierde o

carbono, oxígeno, agua?

gana un electrón?

41. ¿Cuáles de los siguientes son elementos puros: H2, H2O,

51. Para convertirse en un ión positivo, ¿un átomo pierde o

He, Na, NaCI, H2SO4, U?

gana un electrón?

42. Tu amigo dice que lo que distingue a un elemento de

52. Podrías tragarte una cápsula de germanio sin efectos

otro es el número de electrones alrededor del núcleo

dañinos. Pero, si se agrega un protón a cada uno de los

atómico. ¿Estás de acuerdo totalmente, parcialmente o

núcleos de germanio, no querrías tragar la cápsula. ¿Por

nada en absoluto? Explica.

qué? (Consulta la tabla periódica.)

43. ¿Cuál es la causa del movimiento browniano del polvo

y otras partículas pequeñas? ¿Por qué los objetos más

grandes, como las pelotas de béisbol, no son afectados de forma similar?

44. ¿Cuántos átomos hay en una molécula de ácido sulfúrico, H2SO4?

45. Los números de masa de dos isótopos de cobalto son 59 y 60. (a) ¿Cuántos protones y cuántos neutrones hay en cada isótopo? (b) ¿Cuántos electrones en órbita tiene un átomo de cada uno cuando los átomos son eléctricamente neutros?

C A PÍ T U LO 11 R E V ISI Ó N

225

53. El helio es un gas inerte, lo que significa que no se

57. En una mezcla gaseosa de gases hidrógeno y oxígeno,

combina fácilmente con otros elementos. ¿Cuáles otros

ambos con la misma energía cinética, ¿cuáles moléculas

cinco elementos también esperarías que fueran gases

se mueven más rápido en promedio?

inertes? (Consulta la tabla periódica.)

58. Los átomos que constituyen tu cuerpo son

54. ¿Cuál de los siguientes elementos predecirías que tiene

principalmente espacio vacío, y estructuras como la silla

propiedades más parecidas a las del silicio (Si): aluminio

donde te sientas están compuestas de átomos que también

(Al), fósforo (P) o germanio (Ge)? (Consulta la tabla

son principalmente espacio vacío. Entonces, ¿por qué no

periódica.)

te caes a través de la silla?

55. ¿Cuál contribuye más a la masa de un átomo: los electrones o

59. Elabora una pregunta de opción múltiple que demuestre

los protones? ¿Cuál contribuye más al tamaño de un átomo?

que tus compañeros de clase pueden distinguir entre

56. Un átomo de hidrógeno y un átomo de carbono se mueven

cualesquiera dos términos de la lista de Resumen de

con la misma rapidez. ¿Cuál tiene mayor energía cinética?

términos.

P I E N S A Y D I S C U T E (E V A L U A C I Ó N)

60. Un gato pasea por tu patio. Una hora después, un perro

como la del carbono en las formas de vida en algún otro

con la nariz en el suelo sigue el rastro del gato. Discute

planeta?

este suceso desde el punto de vista molecular.

67. ¿En qué sentido puedes decir fidedignamente que eres

61. Si no pudieran escapar moléculas de un cuerpo, ¿el

parte de toda persona en la historia? ¿En qué sentido

cuerpo tendría algún olor?

puedes decir que formarías parte de manera tangible de

62. ¿Dónde se "fabricaron" los átomos que constituyen a un

toda persona que seguirá sobre la Tierra?

recién nacido?

68. ¿Cuáles son las posibilidades de que al menos uno de los

63. Discute por qué iguales masas de bolas de golf y de ping

átomos exhalados por tu primera bocanada en la vida

pong no contienen el mismo número de bolas.

estará en tu siguiente bocanada?

64. Discute por qué iguales masas de átomos de carbono y

69. Hidrógeno y oxígeno siempre reaccionan en una

átomos de oxígeno no contienen el mismo número de

razón 1:8 por masa para formar agua. Los antiguos

partículas.

investigadores pensaban que esto significaba que el

65. Discute cuál contiene más átomos: 1 kg de plomo o 1 kg

oxígeno era ocho veces más masivo que el hidrógeno.

de aluminio.

¿Qué fórmula química supusieron estos investigadores

66. Un átomo de carbono, con una capa exterior medio llena

para el agua?

de electrones (cuatro en una capa que puede contener

70. Alguien le dijo a tu amigo que, si un extraterrestre de

ocho) comparte fácilmente sus electrones con otros

antimateria alguna vez pusiera el pie sobre la Tierra, todo

átomos y forma un gran número de moléculas, muchas

el mundo explotaría en energía radiante pura. Tu amigo

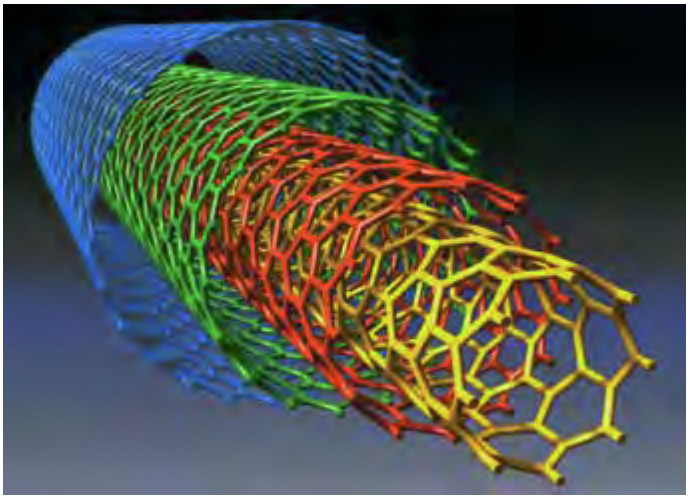
de las cuales son las moléculas orgánicas que forman el

busca tu aprobación o refutación a esta afirmación. ¿Tú

cúmulo de materia viviente. Observa la tabla periódica,

qué dices?

¿cuál otro elemento crees que pueda tener una función



Sólidos 2

12.1 Estructura cristalina

12.2 Densidad

12.3 Elasticidad

3

12.4 Tensión y compresión

12.5 Arcos

12.6 Escalamiento

4

1 Nanotubos de carbono anidados uno dentro de otro proporcionan fibras enormemente fuertes. 2 John Hubisz muestra una imagen ampliada de esta histórica micrografía de 1958 tomada por Eric Müller. 3 La compresión entre piedras contiguas explica la fuerza de los arcos semicirculares que durante siglos se han utilizado en la construcción de portales, puentes y muchas otras estructuras. 4 Estudiantes aplican los principios del escalamiento cuando construyen modelos de puentes en papel durante la clase de física de Garth Orr.

muchos libros de física, matemáticas, ciencia ficción, teo-

logía, historia y filosofía, algunos incluso agotados.

John Hubisz fue un madrugador. ¡Comenzó a enseñar

a los 17 años de edad y nunca se detuvo! Sus enseñan-

zas se aceleraron después de obtener su doctorado en

La especialidad de John en la docencia es aumentar

física y ciencia espacial por parte de la York Universi-

el número de especialistas en física. Su primer curso es

ty en Toronto, Ontario. ¡John ha enseñado física durante

conceptual. Ha usado Física conceptual desde su primera

más de medio siglo! Mientras enseñaba en el College of

edición en 1972 y ha continuado con las ediciones subse-

the Mainland en Texas, se convirtió en el presidente de la

cuentes. John considera que primero debe estimularse el

sección Texas de la American Association of Physics Tea-

interés de los estudiantes y después, luego de un panorama

chers (TSAAPT: Asociación Estadounidense de Profeso-

de física general, continuar con física más computacional.

res de Física Sección Texas). Un par de décadas después,

A finales de la década de 1970 y comienzos de la de 1990,

él y su esposa, Jola, profesora especializada en problemas

una de las aventuras de John fue mejorar la calidad de los

de aprendizaje, comenzaron

libros de texto de física mediante la exposición pública de

una nueva vida en Carolina

los muchos errores que él y otros habían descubierto. En esa

del Norte en la Universi-

época, algunos editores pasaban por alto descaradamente

dad Estatal de Carolina del

los errores de los libros de texto. Desde la exposición de

Norte y en el Wake County

John, los estudiantes de todas partes tienen libros de texto

Public School System (sis-

con mucho menos errores.

tema de educación pública

La vida de servicio de John rebasa con mucho sus acti-

del condado de Wake). Al vidades en física. Aunque por lo general
no se le conoce no haber una sección de la afuera de su círculo de

amistades, él y Jola han adoptado AAPT específica para Caro-y patrocinado a docenas de jóvenes de varias partes del

lina del Norte, John fundó mundo, algunos de manera legal y otros en espíritu, para una, que en la actualidad facilitar su camino hacia la educación superior. Sus "hijos"

es una de las más dinámicas en Estados Unidos. Fungió

han crecido y se han convertido en médicos, ingenieros y,

como secretario-tesorero durante muchos años, fue electo

sí, un investigador en física. La vida de servicio de John

presidente de la sección y después presidente de la AAPT

no conoce fronteras. Hombre de fe y católico comprome-

nacional.

tido, funge como clérigo en la diócesis de Raleigh.

John y Jola son lectores ávidos. La biblioteca es una de

Además de representar maravillosamente la profesión de

las partes principales de su casa, donde pueden encontrarse

maestro de física, John es un ser humano extraordinario.

12.1 Estructura cristalina

Los metales, las sales y la mayor parte de los minerales, los materiales de la Tierra, es-Los seres humanos han utilizado

tán constituidos de cristales. Las personas han conocido durante siglos cristales como materiales sólidos durante muchos

la sal y el cuarzo, pero no fue sino hasta el siglo XX cuando se descubrió que los cris-miles de años. Los nombres de los

tales eran arreglos regulares de átomos. En 1912, los físicos usaron rayos X para con-periodos históricos de la edad de

firmar que cada cristal es un arreglo tridimensional ordenado: una retícula cristalina piedra, la edad de bronce y la edad

de átomos. Se midió que los átomos en un cristal están muy juntos, aproximadamente de hierro manifiestan la importancia de los materiales sólidos en

separados por la misma distancia que la longitud de onda de los rayos X.

el desarrollo de la civilización. Los

El físico alemán Max von Laue descubrió que un haz de rayos X dirigido números y usos de los materiales

hacia un cristal se difracta, o separa, en un patrón característico (Figura 12.1).

se multiplicaron a través de los

Los patrones de difracción de rayos X sobre una película fotográfica muestran siglos, aunque se avanzó poco en

que los cristales son mosaicos bien ordenados de átomos sentados sobre retículas la comprensión de la naturaleza de

regulares, como tableros de ajedrez tridimensionales o juegos infantiles de tubos.

los sólidos. Esta comprensión tuvo

que esperar los descubrimientos

Metales como el hierro, el cobre y el oro tienen estructuras cristalinas relati-acerca de los átomos que tuvieron

vamente simples. El estaño y el cobalto son un poco más complejos. Todos los lugar en el siglo XX. Con dicho

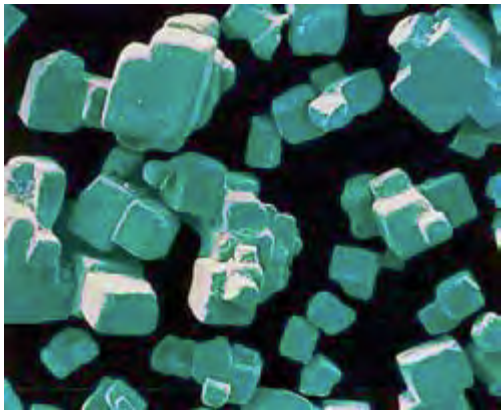
metales contienen una mescolanza de muchos cristales, cada uno casi perfecto, conocimiento, los investigadores

con la misma retícula regular pero con alguna inclinación respecto del cristal más ahora inventan nuevos materiales

cercano. Estos cristales metálicos pueden verse cuando una superficie metálica se diariamente y satisfacen las de-graba, o limpia, con ácido. Puedes ver las estructuras cristalinas en la superficie mandas de la era de la información

del hierro galvanizado expuesta al clima, o sobre los pomos de las puertas de latón de hoy.

grabadas por la sudoración de muchas manos.



F I G U R A 1 2 . 1

Las fotografías de von Laue de los patrones de difrac-

Determinación con rayos X de una

ción de rayos X fascinaron a los científicos ingleses Wi-

estructura cristalina. La fotografía de la

lliam Henry Bragg y a su hijo William Lawrence Bragg,

sal de mesa común (cloruro de sodio) es

quienes desarrollaron una fórmula matemática que de-

producto de la difracción de rayos X.

mostró exactamente cómo deben dispersarse los rayos X

Los rayos provenientes del tubo de

rayos X se bloquean con una pantalla

de las varias capas atómicas regularmente espaciadas de

de plomo excepto por un estrecho

un cristal. Con esta fórmula y un análisis del patrón

haz que golpea al cristal de sal. La

de manchas en un patrón de difracción, pudieron deter-

radiación que penetra el cristal y llega

minar las distancias entre los átomos de un cristal. En la

a la película fotográfica crea el patrón

actualidad, la difracción de rayos X es una herramienta

mostrado. La mancha blanca del centro

vital de la biología y la física.

se debe al haz principal no dispersado de

Se dice que los sólidos no cristalinos son amorfos. En

rayos X. El tamaño y orden de las demás

manchas son resultado de la estructura

el estado amorfo, los átomos y las moléculas de un sólido

reticular de los iones de sodio y cloro en

se distribuyen de manera aleatoria. El caucho, el vidrio

el cristal. Un cristal de cloruro de sodio

y el plástico están entre los materiales que carecen de un

siempre produce este mismo diseño.

arreglo ordenado repetitivo de sus partículas básicas. En

Toda estructura cristalina tiene su propia

muchos sólidos amorfos, las partículas tienen cierta liber-

imagen única de difracción de rayos X.

tad para deambular. Esto es evidente en la elasticidad del

caucho y la tendencia del vidrio a fluir cuando se sujeta a

un esfuerzo durante largos periodos.

Ya sea que los átomos estén en un estado cristalino o en

un estado amorfo, cada átomo o ión vibra en torno a su

Los patrones de difracción del ADN

propia posición. Los átomos están ligados mediante fuerzas de enlace eléctrico. No se (similares al de la sal que se muestra

abordará en este momento el enlace atómico, excepto para mencionar los cuatro tipos aquí), realizados por Maurice

principales de enlaces en los sólidos: iónico, covalente, metálico y de van der Waals, Wilkins y Rosalind Franklin en 1953,

de los cuales el último es el más débil. Algunas propiedades de los sólidos están deter-proporcionaron los datos a partir

de los cuales James D. Watson y

minadas por los tipos de enlaces que tienen. En Internet o en casi cualquier texto de Francis Crick dedujeron la estructu-química puedes encontrar más información sobre estos enlaces.

ra de doble hélice del ADN.

F I G U R A 1 2 . 2

La estructura cristalina del diamante se ilustra con barras que representan los enlaces covalentes que le confieren su extrema dureza.

La fuerza de van der Waals es el

mecanismo que proporciona la

adhesión de los muchos surcos en

las patas de un gecko.

Ión sodio, Na+

Ión cloro, Cl–

F I G U R A 1 2 . 3

La estructura cristalina cúbica de la sal común vista a través de un microscopio. La forma cúbica es consecuencia del arreglo cúbico de los iones de sodio y cloro.

C A PÍ T U LO 12 SÓ L I DOS

229

EL PODER DE LOS CRISTALES

La estructura interna regularmente repetitiva de los átomos hay ninguna evidencia científica que lo respalde (el descubridor de de los cristales les brinda propiedades estéticas que desde

tal tipo especial de energía rápidamente se convertiría en celebridad hace mucho los han hecho atractivos para la joyería. Los

mundial). Desde luego, algún día podría encontrarse evidencia de

cristales también tienen propiedades que son muy importantes

un nuevo tipo de energía, como la energía oscura de la que se habló

para la industria electrónica y óptica, y se usan casi en todo tipo de en el Capítulo 11, pero esto no es lo que afirman los que conjeturan

tecnología moderna. En épocas pasadas, los cristales se valoraban

sobre el poder de los cristales, quienes aseguran que hay evidencia

por sus supuestos poderes curativos. Esta creencia continúa en

científica moderna que sustenta sus afirmaciones.

la actualidad, en particular entre los ocultistas y los curadores

La evidencia del poder de los cristales no es experimental; más

New Age. Se dice que los cristales canalizan la "energía buena" y

bien, se limita a testimonios. Como lo ilustra la publicidad, es alejan la "energía mala". Llevan "vibraciones" que resuenan con

más fácil persuadir a las personas con testimonios que con hechos

las "frecuencias" curativas que ayudan a mantener un equilibrio

confirmados. Los testimonios de personas que están convencidas

corporal benéfico. Cuando se disponen de manera adecuada,

de los beneficios personales de los cristales son frecuentes. Que

se dice que los cristales brindan protección contra las fuerzas

te convenzan con evidencia científica es una cosa; que te convenzan

electromagnéticas dañinas emitidas por las líneas eléctricas, teléfonos con ilusiones, reforzamiento colectivo o con un efecto placebo es

celulares, monitores de computadora, hornos de microondas y otras

muy diferente. Ninguna de las afirmaciones de los poderes especiales

personas. Se ha dicho que está "probado médicamente" que los

de los cristales ha sido respaldada jamás con evidencia científica.

cristales curan y protegen y que tales afirmaciones están "respaldadas Afirmaciones aparte, el usar aretes de cristal parece brindar a algunas por físicos ganadores del Premio Nobel".

personas una buena sensación, incluso una sensación de protección.

Los cristales sí liberan energía, como lo hace cualquier otro Estas sensaciones, y las cualidades estéticas de los cristales, son sus objeto. En el Capítulo 16 aprenderás que todas las cosas radian

auténticas virtudes. Algunas personas creen que los cristales brindan energía, y también que todas las cosas absorben energía. Si un

buena suerte, tal como se supone lo hace el llevar una pata de

cristal, o cualquier sustancia, radia más energía de la que recibe,

conejo en el bolsillo. Sin embargo, la diferencia entre el poder de los su temperatura desciende. Los átomos de los cristales sí vibran y sí cristales y el de la pata de conejo es que los beneficios de los cristales resuenan con frecuencias que coinciden con vibraciones externas,

se expresan en términos científicos, en tanto que las afirmaciones de tal como lo hacen las moléculas de todos los gases y de todos los

los beneficios de portar una pata de conejo no. Por tanto, quienes

líquidos. Si los que conjeturan sobre el poder de los cristales hablan conjeturan sobre el poder de los cristales están en la pseudociencia

de algún tipo de energía especial de los cristales, o de la vida, no

hecha y derecha.

12.2 Densidad

¿El hierro es más pesado que la madera? La pregunta es ambigua, porque depende de las cantidades de hierro y de madera. Un tronco grande claramente es más pesado que un clavo de hierro. Una mejor pregunta es: ¿el hierro es más denso que la madera?, y entonces la respuesta es sí, el hierro es más denso que la madera. Las masas de los átomos y el espaciamiento entre ellos determinan la densidad de los materiales. Se piensa en la densidad como la "ligereza" o "pesadez" de los materiales del mismo tamaño. Es una medida de lo compacto de la materia, de cuánta masa ocupa un espacio dado; es F I G U R A 12 . 4

la cantidad de masa por unidad de volumen:

Cuando el volumen del pan se reduce,

su densidad aumenta.

Densidad = masa

volumen

La densidad (también llamada masa específica) es una propiedad de un material; no importa cuánto material realmente tengas. En la Tabla 12.1 se presentan las densidades de algunos materiales. Por lo general, la densidad se expresa en unidades mé-SCREENCAST:

tricas: kilogramos por metro cúbico, kilogramos por litro o gramos por centímetro cúbico. El agua, por ejemplo, tiene una densidad de masa de 1 g/cm3 o, de manera equiva lente, 1,000 kg/m3. De modo que la masa de un metro cúbico de agua fresca es 1,000 kg mientras que, de manera equivalente, la masa de un centímetro cúbico Un metro cúbico es un volumen

mensurable y contiene un millón

(aproxima damente el tamaño de un cubo de azúcar) de agua fresca es 1 g.

de centímetros cúbicos. En un

La densidad puede expresarse en términos de peso más que de masa. Esto es den-metro cúbico hay un millón de

sidad de peso, comúnmente llamada peso específico, que se define como peso por uni-gramos de agua (o, de manera

dad de volumen:

equivalente, 1,000 kilogramos de

agua en un metro cúbico); por

Densidad de peso = peso

tanto, 1 g/cm3 5 1,000 kg/m3.

volumen

230

PA R T E D OS

P RO P I EDA D ES D E L A M AT ER I A

T A B L A 1 2 . 1

La densidad de peso se mide en N/m3. Dado que un cuerpo de 1 kg tiene un peso de ***DENSIDADES DE SUSTANCIAS***

9.8 N, la densidad de peso es numéricamente 9.8 3 densidad de masa. Por ejemplo, la ***COMUNES (kg/m3) (PARA***

densidad de peso del agua es 9,800 N/m3. En el sistema británico, 1 pie cúbico (ft3) ***DENSIDAD EN g/cm3, DIVIDE***

de agua fresca (casi 7.5 galones) pesa 62.4 libras. Por tanto, en el sistema británico, el ***ENTRE 1,000)***

agua fresca tiene una densidad de peso de 62.4 lb/ft3.

Sólidos

Densidad

La densidad de un material depende de las masas de cada átomo que lo constituye Iridio

22,650

y del espaciamiento entre dichos átomos. El iridio, un metal blanco-plateado, duro y Osmio

22,610

quebradizo, de la familia del platino, es la sustancia más densa sobre la Tierra. Aun-Platino

21,090

que cada átomo de iridio es menos masivo que cada átomo de platino, oro, plomo o uranio, el poco espaciamiento de los átomos de iridio en la forma cristalina contribuye Oro

19,300

a su mayor densidad. Más átomos de iridio caben en un centímetro cúbico que otros Uranio

19,050

átomos más masivos, pero con espacios más amplios. En consecuencia, el iridio tiene Plomo

11,340

una colosal densidad de 22,650 kg/m3.

Plata

10,490

Cobre

8,920

Hierro

7,870

P U N T O D E C O N T R O L

Aluminio

2,700

***1. Aquí va una facilita: Cuando el agua se congela, se expande. ¿Qué dice** Hielo*

919

esto acerca de la densidad del hielo comparada con la densidad del agua?

2. Aquí va una un poco más truculenta: ¿Qué pesa más: un litro de hielo o Líquidos

un litro de agua?

Mercurio

13,600

3. ¿Cuál tiene mayor densidad: 100 kg de plomo o 1,000 kg de aluminio?

Glicerina

1,260

4. ¿Cuál es la densidad de 1,000 kg de agua?

Agua de mar

1,025

5. ¿Cuál es el volumen de 1,000 kg de agua?

Agua a 4 °C

1,000

Alcohol etílico

785

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

Gasolina

680

1. *El hielo es menos denso que el agua (porque tiene más volumen para la misma masa), por lo que el hielo flota en el agua.*

2. *¡No digas que pesan lo mismo! Un litro de agua pesa más. Si está congelada, entonces su volumen será más que un litro. Si recortas la parte que sobresale, de modo que el trozo de hielo tenga el mismo tamaño que el litro de agua original, ciertamente pesará menos.*

SCREENCAST: Problema cuarzo-oro

3. *La densidad es una razón de masa y volumen (o peso y volumen), y esta razón es mayor para cualquier cantidad de plomo que para cualquier cantidad de aluminio; consulta la Tabla 12.1.*

4. *La densidad de cualquier cantidad de agua es 1,000 kg/m3 (o 1 g/ cm3).*

5. *El volumen de 1,000 kg de agua es 1 m3.*

12.3 *Elasticidad*

Cuando un objeto está sujeto a fuerzas externas, experimenta cambios en su tamaño, o en su forma, o en ambos. Los cambios dependen del arreglo y enlace de los átomos del material. Un resorte, por ejemplo, puede estirarse o comprimirse mediante fuerzas externas.

F I G U R A 1 2 . 5

Un peso que se cuelga de un resorte estira el resorte. Si se agrega peso, se estira aún Tanto Stephanie como el árbol están

más. Si los pesos se retiran, el resorte regresa a su longitud original. Se dice que el resor-compuestos principalmente de hidró-

te es elástico. Cuando un bateador golpea una pelota de béisbol, el bate temporalmente geno, oxígeno y carbono. La ingestión

cambia la forma de la bola. Un arquero, a punto de disparar una flecha, primero dobla de alimentos le proporciona éstos a

Stephanie, en tanto que el árbol obtiene

el arco, que recupera su forma original cuando la flecha se suelta. El resorte, la pelota la mayor parte de su oxígeno y carbono

de béisbol y el arco son ejemplos de objetos elásticos. La ***elasticidad*** *de un cuerpo des-del aire. En este sentido, un árbol puede*

cribe cuánto cambia su forma cuando una fuerza deformadora actúa sobre él, y cómo considerarse como "aire sólido".

regresa a su forma original cuando la fuerza se retira. La masilla, la arcilla, la masa

para panadería y el plomo no regresan a su forma original cuando se aplica una fuerza deformadora y luego se quita. Los materiales como éstos, que no recuperan su forma original después de deformarse, se dice que son inelásticos.

Cuando cuelgas un peso sobre un resorte, el peso aplica una fuerza al resorte y esto estira el resorte. El doble de peso causa el doble de

estiramiento; el triple de fuerza causa el triple de estiramiento. Más pesos estiran el resorte aún más. Es posible decir que: F □ x

Es decir, el estiramiento es directamente proporcional a la fuerza aplicada (Fi- ***FIGUR A 12.6***

gura 12.7). Esta relación, que a mediados del siglo XVII observó el físico británico Una pelota de béisbol es elástica.

Robert Hooke, contemporáneo de Isaac Newton, se llama ***ley de Hooke****.*

Si un material elástico se estira o comprime más allá de determinada cantidad, no regresará a su estado original y permanecerá distorsionado. La distancia más allá de la cual ocurre una distorsión permanente se llama límite elástico. La ley de Hooke se sostiene sólo en tanto la fuerza no estire o comprima el material más allá de su límite elástico.

F I G U R A 1 2 . 7

El estiramiento del resorte es directa-

mente proporcional a la fuerza aplicada.

Si el peso se duplica, el resorte se estira

el doble.

P U N T O D E C O N T R O L

1. Una antigua pintura de 2 kg cuelga del extremo de un resorte. El resorte *Robert Hooke, uno de los más gran-se estira una distancia de 10 cm. Si, en lugar de ella, del mismo resorte se des científicos de Inglaterra, fue el*

cuelga una pintura de 4 kg, ¿cuánto se estirará el resorte? ¿Y si del *primero en proponer una teoría*

mismo resorte se cuelga una pintura de 6 kg? (Supón que ninguna de *ondulatoria de la luz y el primero*

estas cargas estira el resorte más allá de su límite elástico.)

en describir la célula (por lo que

llegó a considerarse como el padre

2. Si una fuerza de 10 N estira cierto resorte 4 cm, ¿cuánto

estiramiento *de la microscopía). Como artista y*

ocurrirá con una fuerza aplicada de 15 N?

agrimensor, ayudó a Christopher

Wren a reconstruir Londres después

del gran incendio de 1666. Como

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

físico, colaboró con Robert Boyle

1. *Una carga de 4 kg (la pintura en este caso) tiene el doble de peso que una carga y otros físicos de su época y fue*

de 2 kg. De acuerdo con la ley de Hooke, F

elegido para encabezar la Royal So -

D x, 2 veces la fuerza aplicada resul-

ta en 2 veces el estiramiento, de modo que el resorte se estira 20 cm. El peso ciety. A la muerte de Hooke, Isaac

Newton se convirtió en presidente

de la carga de 6 kg hace que el resorte se estire 3 veces, 30 cm. (Si se supera el de la Royal Society y celosamente des -

límite elástico, la cantidad de estiramiento no podría predecirse con la informa-truyó todo lo que pudo de la obra

ción dada.)

de Hooke. En la actualidad no sobre-

2. *El resorte se estirará 6 cm. Por razón y proporción (10 N)/(4 cm) 5 (15 N)/(x cm), viven pinturas ni cosas similares de*

que se lee: 10 newtons es a 4 centímetros como 15 newtons es a x centíme -

Robert Hooke.

tros; entonces x 5 6 cm. Si tomas clases en el laboratorio, aprenderás que la razón entre la fuerza y el estiramiento se llama constante de resorte, k

(en este caso, k 5 2.5 N/cm), y la ley de Hooke se expresa con la ecuación F 5 k D x.

***12.4** Tensión y compresión*

Cuando algo se jala (se estira), se dice que está en tensión. Cuando se empuja (se oprime), está en compresión. Si doblas una regla (o cualquier vara), la parte curvada exterior está en tensión. La parte curvada interior, sobre la que se empuja, está en compresión. La tensión hace que las cosas se alarguen y se adelgacen, en tanto que la compresión hace que las cosas se acorten y se ensanchen. Sin embargo, esto no es tan evidente en la mayoría de los materiales rígidos, porque el alargamiento o el acortamiento es muy pequeño.

El acero es un excelente material elástico porque puede soportar grandes fuerzas y luego regresar a su tamaño y forma originales. Debido a su resistencia y propiedades elásticas, se usa no sólo para fabricar resortes, sino también para vigas de construcción.

Las vigas verticales de acero utilizadas en la construcción de edificios altos experimen-El esmalte de tus dientes es la sus-

tan sólo una compresión ligera. Una viga de acero vertical típica de 25 metros de largo tancia más dura de tu cuerpo.

(columna) utilizada en la construcción de rascacielos se comprime aproximadamente un milímetro cuando soporta una carga de 10 ton. Esto puede acumularse. Un edificio de 70 a 80 pisos puede comprimir las enormes columnas de acero en su base aproximadamente 2.5 centímetros (toda una pulgada) cuando se concluye la construcción.

F I G U R A 1 2 . 8

La parte superior de la viga se estira y la

parte inferior se comprime. ¿Qué ocurre

en la porción media, entre las partes

superior e inferior?

Hay más deformación cuando las vigas se usan horizontalmente, donde tienden a pandearse bajo cargas pesadas. Cuando una viga horizontal se sostiene en uno o ambos extremos, está bajo tensión y bajo compresión tanto de su peso como de la carga que soporta. Considera la viga horizontal sostenida de un extremo (conocida como viga voladiza) de la Figura 12.8. Se pandea debido a su propio peso y al de la carga que soporta en su extremo. Un poco de razonamiento te mostrará que la parte superior de la viga tiende a estirarse. Los átomos tienden a separarse.

Un trampolín con un clavadista

La parte superior es un poco más larga y está bajo tensión. Más razonamiento de pie en un extremo es una viga

revela que la parte inferior de la viga está oprimida. Ahí los átomos se apachurran voladiza.

contra los demás: están comprimidos. La parte inferior es un poco más corta debido a la forma en que se dobla. ¿Puedes ver que, en alguna parte entre la parte superior y la inferior, hay una región donde no sucede nada, donde no hay ni tensión ni compresión? Esta es la capa neutra.

La viga horizontal que se muestra en la Figura 12.9, conocida como viga simple, está sostenida en ambos extremos y lleva una carga en medio. Aquí hay compresión en la parte superior de la viga y tensión en la parte inferior. De nuevo, hay una capa neutra a lo largo de la porción media del grosor de la viga en toda su longitud.

FIGURA 12.9

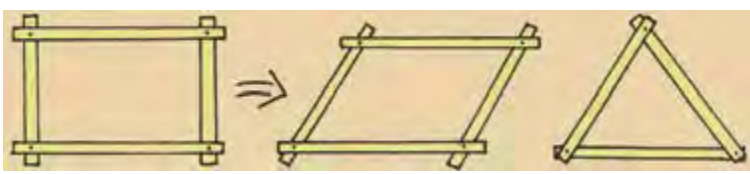
La parte superior de la viga está com-

primida y la parte inferior está estirada.

¿Dónde está la capa neutra (la parte que

no está bajo esfuerzo debido a tensión o

compresión)?



PRACTICANDO LA FÍSICA: FUERZA DE LAS VARAS

Si clavas cuatro varas para formar un rectángulo, pue- varas e inténtalo, y luego mira los triángulos que se utilizan den deformarse en un paralelogramo sin demasiado

para fortalecer muchas clases de estructuras.

esfuerzo. Pero, si clavas tres varas para formar un

triángulo, la forma no puede cambiarse sin realmente rom-

per las varas o desprender los clavos. El triángulo es la más

fuerte de todas las figuras geométricas, es por eso que en

los puentes se ven formas triangulares. Adelante: clava tres

Con la capa neutra en mente, puedes ver por qué la sección transversal de las vigas de acero tiene la forma de la letra I (Figura 12.10). La mayor parte del material de estas vigas I se concentra en las aletas superior e inferior. Cuando la viga se utiliza horizontalmente en construcción, el esfuerzo es predominantemente en las aletas superior e inferior. Una aleta se oprime mientras la otra se estira, y las dos aletas virtualmente soportan todos los esfuerzos en la viga. Entre las aletas hay una región relativamente libre de esfuerzo, el alma, que actúa sobre todo para mantener bien separadas las aletas superior e inferior. Debido al alma, se necesita comparativamente poco material. Una viga I es casi tan fuerte como una barra rectangular sólida de las mismas dimensiones totales, con mucho menos peso. Una viga rectangular larga de ***F I G U R A 1 2 . 1 0***

acero después de cierto tiempo puede quebrarse debido a su propio peso, en tanto Una viga I es como una barra sólida a que una viga I de la misma profundidad podría soportar mucho más carga.

la que se le quitó parte del acero de en

medio, donde se necesita menos. En

consecuencia, la viga es más ligera, pero

tiene casi la misma fuerza.

F I G U R A 1 2 . 1 1

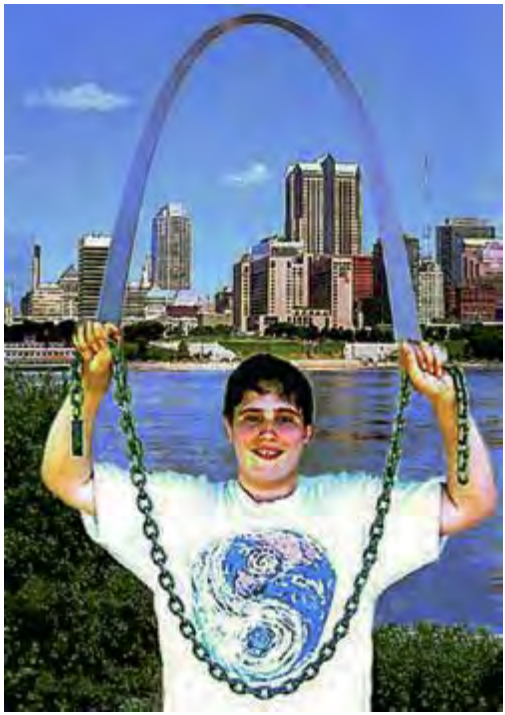
La mitad superior de cada rama horizon-

tal está bajo tensión debido al peso de la rama, en tanto que la mitad inferior está bajo compresión. ¿En qué lugar la madera no está ni estirada ni comprimida?

P U N T O D E C O N T R O L

1. Cuando caminas sobre el entarimado de una casa antigua que se pandea debido a tu peso, ¿dónde está la capa neutra?

2. Supón que taladras un agujero horizontalmente a través de la rama de un árbol, como se muestra. ¿Dónde el agujero debilita menos la rama: a través de la porción superior, la porción media o la porción inferior de la rama?



C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *La capa neutra está a la mitad entre las superficies superior e inferior del entarimado.*

2. *Taladra el agujero horizontalmente a través del medio de la rama, a través de la capa neutra: un agujero en dicha ubicación difícilmente afectará la resistencia de la rama porque las fibras ahí no están ni estiradas ni comprimidas. Las fibras de madera de la parte superior están estiradas, de modo que taladrar un agujero ahí puede hacer que las fibras se separen. Las fibras de la parte inferior están comprimidas, de modo que al taladrar un agujero ahí puede aplastarse bajo compresión.*

12.5 *Arcos*

La piedra se rompe con más facilidad bajo tensión que bajo compresión. Los techos de estructuras de piedra construidos por los egipcios durante la época de las pirámides se construyeron con muchas losas de piedra horizontales. Debido a la debilidad de dichas losas bajo las fuerzas producidas por la gravedad, tuvieron que erigirse muchas columnas verticales que soportaran los techos. Lo mismo sucedió con los templos en la antigua Grecia. Luego llegaron los arcos y menos columnas verticales.

F I G U R A 1 2 . 1 2

F I G U R A 1 2 . 1 3

Las losas horizontales de piedra del techo no pueden ser muy largas porque la piedra se rompe fácil-Arcos de piedra semicirculares comunes,

mente bajo tensión. Es por eso que se necesitan muchas columnas verticales para soportar el techo.

que han permanecido en pie durante siglos.

Observa la parte superior de las ventanas de los antiguos edificios de ladrillo. Hay posibilidades de que la parte superior sea arqueada. Lo mismo ocurre con la forma de los antiguos puentes de piedra. Cuando se coloca una carga sobre una estructura arqueada de manera adecuada, la compresión refuerza en lugar de debilitar la estructura. Las piedras se empujan entre sí más firmemente y se mantienen unidas mediante fuerzas compresivas. Con la forma correcta del arco, las piedras ni siquiera necesitan cemento para mantenerse unidas.

Cuando la carga que se soporta es uniforme y se extiende horizontalmente, como en un puente, la forma adecuada es una parábola, la misma curva

que sigue una bola lanzada. Los cables de un puente colgante son un ejemplo de un arco parabólico "de cabeza". Si, por otra parte, el arco sólo se sostiene por su propio peso, la curva que le brinda máxima fuerza se llama catenaria. Una catenaria es una curva que se forma por una soga o cadena colgada entre dos puntos de apoyo. La tensión a lo largo de cada parte de la soga o cadena es paralela a la curva. De modo que, cuando un arco libre adopta la forma de una catenaria invertida, la compresión en su interior es paralela en todas ***F I G U R A 1 2 . 1 4***

partes al arco, de la misma manera como la tensión entre eslabones contiguos de una Tanto la curva de una cadena colgante

sostenida por Manuel como el Gateway

cadena colgante es paralela en todas partes a la cadena. El Gateway Arch, que decora la Arch de St. Louis son catenarias.

ribera de St. Louis, Missouri, es una catenaria (Figura 12.14).

C A PÍ T U LO 12 SÓ L I DOS

235

F I G U R A 1 2 . 1 5

El peso del domo produce compresión, no tensión, de modo que no se necesitan columnas de soporte en medio.

Si giras un arco a través de un círculo completo, tienes un domo. El peso del domo,

¡Un arco en forma de catenaria

como el del arco, produce compresión. Los domos modernos, como el Astrodome de incluso podría fabricarse con

Houston, están inspirados en catenarias tridimensionales y cubren grandes áreas sin bloques resbaladizos de hielo!

la interrupción de columnas. Hay domos bajos (el monumento a Jefferson) y altos (el Siempre que las fuerzas compresivas entre los bloques sean parale-

Capitolio de Estados Unidos). Y mucho antes que éstos, hubo iglúes en el Ártico.

las al arco y que la temperatura no

aumente lo suficiente para causar

su derretimiento, el arco permane-

cerá estable.

FABRICACIÓN ADITIVA O IMPRESIÓN 3-D

En la fabricación a través de los siglos, los artesanos

comenzaron con un trozo de material al que le retiraban pe-

dazos con cortes y perforaciones hasta que elaboraban un

producto terminado, un proceso sustractivo. Pero la naturaleza siempre lo ha hecho de manera diferente en los procesos biológicos. En lugar

de quitar material (y desecharlo), la naturaleza construye las cosas

átomo por átomo, un proceso aditivo. Durante más de una década, las impresoras de inyección de tinta han hecho en gran parte lo mismo,

precisamente escupiendo una serie de gotas de tinta para producir

imágenes, gota a gota. Era cuestión de tiempo antes de que este

proceso pasara de depositar tinta para formar imágenes, a depositar

gotas de material para elaborar objetos sólidos. Dicha tecnología llegó y transformó la forma de fabricar las cosas.

Este proceso de impresión tridimensional usa tecnología digital.

El dispositivo de impresión lee el diseño y tiende sucesivas capas de líquido, polvo o material de láminas para construir un objeto de

de células vivas que se depositan sobre un medio gelatinoso o

sección transversal en sección transversal. Estas capas se unen o

matriz de azúcar y que se acumulan para formar estructuras

fusionan de manera automática para crear el producto final, que

tridimensionales. Las implantaciones de prótesis de cadera

puede tener casi cualquier forma geométrica. Los dispositivos de

personalizadas ya son frecuentes. Edificios y hábitats espaciales
impresión difieren en los materiales que se utilizan y en la forma
están sobre las mesas de dibujo, de modo que esta tecnología no
en que se depositan las capas para crear productos. Una aplicación
se restringe a cosas pequeñas. Las aplicaciones parecen ilimitadas.
es la fabricación de órganos y partes corporales a partir de capas
Espera el crecimiento fenomenal de la fabricación aditiva.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Por qué es más fácil que un polluelo dentro de un cascarón salga de él, a

que un pollo fuera del cascarón entre en él?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Para entrar en el cascarón, un pollo que está afuera debe luchar con la compresión, que resiste enormemente el rompimiento del cascarón. Pero, cuando un polluelo sale desde el interior, sólo debe superar la tensión más débil del cascarón. Para ver que la compresión del cascarón exige mayor fuerza, trata de romper un huevo por su eje largo al oprimirlo entre el pulgar y los demás dedos. ¿Sorprendido? Inténtalo por su diámetro más corto. ¿Sorprendido? (Haz este experimento sobre un fregadero con algún tipo de protección, como guantes, para posibles esquirlas de cascarón.)
***12.6** Escalamiento1*

¿Alguna vez has notado cuán fuerte es una hormiga para su tamaño? Una hormiga puede transportar el peso de varias hormigas sobre su espalda, en tanto que un elefante fuerte Galileo estudió el escalamiento

tendría mucha dificultad para transportar incluso un solo elefante. ¿Cuán fuerte sería y diferenció los tamaños de los

huesos de diversas criaturas.

una hormiga si aumentara su escala al tamaño de un elefante? ¿Esta "súper hormiga"

sería varias veces más fuerte que un elefante? Sorprendentemente, la respuesta es no. Tal hormiga no podría levantar su propio peso del suelo. Sus patas serían muy delgadas para su enorme peso y es probable que se rompieran.

Hay una razón por la que las patas de la hormiga son delgadas y las patas del elefante son gruesas. A medida que el tamaño de una cosa aumenta, se vuelve más pesada mucho más rápido de lo que se vuelve más fuerte. Puedes sostener un palillo de dientes horizontalmente de sus extremos y observar que no se pandea. Pero sostén horizontalmente por sus extremos todo un tronco de árbol del mismo tipo de madera y observarás un pandeo considerable. En relación con su peso, el palillo de dientes es mucho más fuerte que el Una esfera tiene la menor área

árbol. El ***escalamiento*** *es el estudio de cómo el volumen y la forma (el tamaño) de cual-por volumen. Ahora sabes por*

qué los depósitos de agua eleva-

quier objeto afecta las relaciones entre su fuerza, peso y área superficial.

dos con frecuencia son esféricos.

La fuerza se relaciona con el área de la sección transversal (que es bidimensional y se mide en centímetros cuadrados), en tanto que el peso se relaciona con el volumen (que es tridimensional y se mide en centímetros cúbicos). Para entender esta relación Longitud de lado = 2 cm

Área transversal = 4 cm2

Longitud de lado = 1 cm

Volumen (2×2×2) = 8 cm3

VIDEO: Escalamiento

Área transversal = 1 cm2

2

Masa = 8 g

Volumen (1×1×1) = 1 cm3

Masa = 1 g

2

2

1

4

F I G U R A 1 2 . 1 6

A medida que las dimensiones linea-

1

1

les de un objeto cambian por algún

factor, el área transversal cambia por el

cuadrado de este factor, y el volumen (y,

3

4

4

Longitud de lado = 3 cm

por tanto, el peso) cambia por el cubo de

Área transversal = 9 cm2

este factor. Se observa que, cuando las

dimensiones lineales se duplican (factor

Volumen (3×3×3) = 27 cm3

Longitud de lado = 4 cm

2), el área crece por 22 5 4 y el volumen

Masa = 27 g

3

3

Área transversal = 16 cm2

crece por 23 5 8.

Volumen (4×4×4) = 64 cm3

Masa = 64 g

1El material de esta sección se basa en dos sensacionales e informativos ensayos: "On Being the Right Size" de J. B. S. Haldane y "On Magnitude" de sir D'Arcy Wentworth Thompson, ambos en James R. Newman (ed.), The World of Mathematics, vol. II (New York: Simon & Schuster, 1956).

C A PÍ T U LO 12 SÓ L I DOS

237

cuadrado-cubo, piensa en el caso más simple de un cubo sólido de materia, de 1 centímetro por lado; por decir, un pequeño cubo de azúcar. Cualquier cubo de 1 centímetro cúbico tiene una sección transversal de 1 centímetro cuadrado; esto es: si rebanas el cubo en sentido paralelo a una de sus caras, el área rebanada sería de 1 centímetro cuadrado.

Compara esto con un cubo hecho del mismo material que tenga el doble de dimensiones lineales: un cubo de 2 centímetros por lado. Como se muestra en la Figura 12.16, su área transversal es 2 3 2, o 4 centímetros cuadrados, y su volumen es 2 3 2 3 2, u 8 centímetros cuadrados. Por tanto, el cubo más grande es 4 veces más fuerte, pero 8 veces más pesado. Una revisión cuidadosa de la Figura 12.16 muestra que, para aumentos de dimensiones lineales, el área transversal y el área total crecen por el cuadrado del aumento, en tanto que el volumen y el peso crecen por el cubo del aumento.

El volumen (y, por tanto, el peso) aumenta mucho más rápido que el correspondiente aumento del área transversal. Aunque la Figura 12.16 demuestra el ejemplo simple de un cubo, el principio se aplica a un objeto de cualquier forma. Piensa en un jugador de fútbol que puede hacer muchas lagartijas. Supón que de algún modo pudiera aumentar su escala al doble de su tamaño; esto es: el doble de alto y el doble de ancho, con sus huesos al doble de grueso y cada dimensión lineal aumentada por un factor de 2. ¿Sería el doble de fuerte y podría levantarse con el doble de facilidad? La respues- ***F I G U R A 1 2 .17***

ta es no. Aunque sus brazos del doble de grueso tendrían 4 veces el área transversal y Sillas con aumento de escala en el serían 4 veces más fuertes, él sería 8 veces más pesado. Con un esfuerzo similar, podría Exploratorium, cada una con el doble de levantar sólo la mitad de su peso. Con este aumento de peso, sería más débil que antes. tamaño.

En la naturaleza se observa que los animales grandes tienen patas desproporcionadamente gruesas comparadas con las de los animales pequeños. Esto se debe a la relación entre el volumen y el área: el hecho de que el volumen (y el peso) crecen por el cubo del factor por el cual aumenta la dimensión lineal, en tanto que la fuerza (y el área) ***VIDEO: Área superficial***

crecen por el cuadrado del factor de aumento. Así que puedes ver que hay una razón ***contra volumen***

por la que un ciervo o un antílope tienen las patas delgadas, así como un rinoceronte, un hipopótamo o un elefante tienen las patas gruesas. Es interesante que la necesidad de las criaturas grandes de tener patas gruesas la sortean muy bien las ballenas, pues la flotabilidad del agua les proporciona sostén. Incluso los hipopótamos pasan gran parte de su tiempo en el agua.

Leonardo da Vinci fue el primero

Conocer sobre el escalamiento te permite saber que uno no puede tomarse en serio en señalar que el área transversal

la gran fuerza atribuida a King Kong y a otros gigantes ficticios. El hecho de que las de un tronco de árbol es igual a

consecuencias del escalamiento se ignoren convenientemente es una de las diferencias las áreas superficiales combinadas

producidas al hacer un corte ho-

entre la ciencia y la ciencia ficción.

rizontal por todas las ramas más

También es importante comparar el área superficial total con el volumen (Figu-arriba del árbol (pero perpendicu-

ra 12.18). El área superficial total, tal como el área transversal, crecen en proporción lar a cada rama). Lo mismo sucede

al cuadrado de las dimensiones lineales de un objeto, en tanto que el volumen crece en con las áreas transversales de los

proporción al cubo de las dimensiones lineales. De modo que, a medida que un objeto capilares con la sección transversal de la vena que les suminis-

tra sangre.

El área superficial de un

volumen de 1 cm3 (se

muestra abierto) es

6 cm2: la razón de

área superficial

6

=

volumen

1

Cuando el volumen de un cubo

Cuando el volumen de un cubo es 3×3×3

F I G U R A 1 2 . 1 8

es 2×2×2 (8 cm3) el área

(27 cm3) el área superficial es 54 cm2:

A medida que el tamaño de un objeto

superficial es 24 cm2: la razón de

la razón de

aumenta, hay un mayor aumento de

área superficial

24

3

área superficial

54

2

su volumen que de su área superfi-

=

=

=

=

volumen

8

1

volumen

27

1

cial; como resultado, la razón del área

superficial con respecto al volumen

disminuye.

crece, su área superficial y su volumen crecen a diferentes tasas, con el resultado de que la razón del área superficial con respecto al volumen disminuye. En otras palabras, tanto el área superficial como el volumen de un objeto que crece aumentan, pero el crecimiento ***SCREENCAST:***

del área superficial en relación con el crecimiento del volumen disminuye. No muchas ***Escalamiento 1***

personas entienden realmente este concepto. Los siguientes ejemplos pueden ser útiles.

Un chef sabe que si pela 5 kg de patatas pequeñas saldrán más cáscaras que si pela 5 kg de patatas grandes. Los objetos más pequeños tienen más área superficial por kilogramo.

Las patatas a la francesa se cocinan más rápidamente en aceite que las patatas más gruesas. Las hamburguesas aplanadas se cocinan más rápido que las albóndigas de la misma ***SCREENCAST:***

masa. El hielo triturado enfría una bebida mucho más rápido que un solo cubo de hielo ***Escalamiento 2***

de la misma masa, porque el hielo triturado presenta más área superficial a la bebida. La esponja de acero se oxida en el fregadero en tanto que los cuchillos de acero se oxidan más lentamente. El hierro se oxida cuando se expone al aire, pero se oxida mucho más rápido, y pronto se carcome, si está en forma de pequeñas hebras o filamentos.

La combustión es una interacción entre las moléculas de oxígeno que están

en el ***SCREENCAST:***

aire y las moléculas que están en la superficie del combustible. Es por eso que los trozos ***Escalamiento 3***

de carbón arden en tanto que el polvo de carbón explota cuando se enciende, y es por eso que se encienden fogatas con muchos pedazos delgados de madera y no con la misma masa de madera en un solo tronco. Todo esto es consecuencia de que el volumen y el área no están en proporción directa uno con otra.

P U N T O D E C O N T R O L

1. Considera un cubo de 1 cm3 aumentado hasta la

escala de un cubo de 10 cm de largo en cada arista.

a. ¿Cuál es el volumen del cubo a mayor escala?

b. ¿Cuál es su área superficial transversal?

c. ¿Cuál es su área superficial total?

2. Si de alguna forma pudieras aumentar tu escala

al doble de tu tamaño al tiempo que conservas

tus proporciones actuales, ¿serías más fuerte o

más débil? Explica tu razonamiento.

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *a. El volumen del cubo a mayor escala es (10 cm)3 o 1,000 cm3.*

b. Su área superficial transversal es (10 cm)2 o 100 cm2.

c . Su área superficial total 5 6 lados 3 área de un lado 5 6 3 (10 cm)2 5 600 cm2.

2. *Tu yo aumentado en escala sería 4 veces más fuerte porque el área transversal de tus huesos y músculos el doble de gruesos aumentaría por 4. Podrías levantar una carga 4*

veces más pesada. Pero tu peso sería 8 veces mayor que antes, de modo que no serías más fuerte en relación con tu mayor peso. Tendrías 4 veces la fuerza pero levantarías 8

veces el peso, lo que te da una razón de la fuerza con respecto al peso de sólo la mitad de su valor anterior. De modo que, si apenas puedes levantar tu propio peso ahora, cuando aumentes de escala sólo podrías levantar la mitad de tu nuevo peso. Tu fuerza aumentaría, pero tu razón fuerza respecto del peso disminuiría. ¡Quédate como estás!

Las grandes orejas de los elefantes africanos es una manera como la naturaleza com-F I G U R A 1 2 . 1 9

pensa la pequeña razón del área superficial con respecto al volumen en estas grandes El elefante africano tiene menos área

criaturas. Las grandes orejas pueden mejorar la audición pero, mejor aún, aumentan superficial en relación con su peso que

el enfriamiento. La tasa a la que una criatura genera calor es proporcional a su masa (o muchos otros animales. Esto lo compen-volumen), pero el calor que puede disipar es proporcional a su área superficial. Si un sa con sus grandes orejas, que aumentan

elefante africano no tuviera grandes orejas, no tendría suficiente área superficial para significativamente su área superficial

enfriar su enorme masa. Las orejas grandes aumentan enormemente su área superficial radiante y facilitan el enfriamiento del

total, lo que facilita el enfriamiento en los climas calurosos.

cuerpo.

C A PÍ T U LO 12 SÓ L I DOS

239

A nivel microscópico, las células vivas deben lidiar con el hecho de que el crecimiento de volumen es más rápido que el crecimiento del área superficial. Las células obtienen nutrientes mediante difusión a través de sus superficies. A medida que las células crecen, su área superficial aumenta, pero no tan rápido como para seguir el ritmo de crecimiento de su volumen. Por ejemplo, si el área superficial aumenta por 4, el volumen correspondiente aumenta por 8. Ocho veces más masa debe sostenerse sólo con 4 veces más nutrientes. En algún tamaño, el área superficial no es tan grande como para permitir que pasen nutrientes suficientes hacia la célula, lo que impone un límite a qué tan grande puede crecer la célula. De modo que las células se dividen y hay vida como se le conoce. Eso es bueno.

No tan bueno es el destino de los grandes animales cuando caen. El dicho "mientras más grandes son, más fuerte caen" es cierto y es consecuencia de la pequeña razón del área superficial con respecto al peso. La resistencia del aire al movimiento a través de éste depende del área superficial del objeto en movimiento. Si caes desde un risco, incluso con resistencia del aire, tu rapidez aumentaría a la tasa muy cercana de 1 g. Tu rapidez

terminal (la rapidez a la cual la fuerza de la resistencia del aire sobre ti es igual a tu peso) sería grande a menos que usaras un paracaídas que aumentara tu área superfi- ***F I G U R A 12 . 2 0***

cial. Los animales pequeños no necesitan paracaídas.

La larga cola del mono no sólo lo ayuda

Observa cómo el escalamiento afecta a las criaturas pequeñas. Si tus dimensiones a mantener su equilibrio, sino también a lineales se hacen más pequeñas por un factor de 10, tu área disminuiría por un factor radiar de manera efectiva el exceso de de 100, pero tu peso disminuiría por 1,000. Ser tan pequeño significa que tendrías 10 calor.

veces más área superficial en relación con tu peso, de modo que tendrías una rapidez terminal mucho menor. Es por esto que un insecto puede caer desde la copa de un árbol hasta el suelo sin lastimarse. La razón del área superficial con respecto al peso está en favor del insecto; en cierto sentido, el insecto es su propio paracaídas.

Las disímiles consecuencias de una caída son sólo una ilustración de las diferentes relaciones que los organismos grandes y pequeños tienen con el ambiente físico. La fuerza de gravedad es pequeña para los insectos en comparación con las fuerzas de cohesión (adhesividad) entre sus pies y las superficies sobre las que caminan. Es por eso Las gotas de lluvia grandes

que una mosca puede trepar por una pared o caminar en el techo ignorando por com-caen más rápido que las gotas

pequeñas, y los peces grandes

pleto la gravedad. Los seres humanos y los elefantes no pueden hacer eso. Las vidas de nadan más rápido que los peces

las criaturas pequeñas están regidas no por la gravedad, sino por fuerzas como la ten-pequeños.

sión superficial, la cohesión y la capilaridad, que se abordarán en el siguiente capítulo.

Es interesante observar que el ritmo cardiaco de un mamífero guarda relación con el tamaño del mamífero. El corazón de una pequeña musaraña late aproximadamente 20 veces más rápido que el corazón de un elefante. En general, los mamíferos pequeños viven rápido y mueren jóvenes; los animales más grandes viven a ritmo pausado y viven Las gotas de lluvia pueden tener

más tiempo. No te sientas mal por un hámster que no viva tanto como un perro. Todos hasta 8 mm de diámetro. Las gotas

los animales de sangre caliente tienen aproximadamente el mismo lapso de vida, no en de alrededor de 1 mm de diámetro

términos de años, sino en el número promedio de latidos cardiacos (alrededor de 800

son esféricas; a los 2 mm, se apla-

millones). Los seres humanos son la excepción: viven de dos a tres veces más que otros nan como una hamburguesa; y a

mamíferos de su tamaño.

los 5 mm, la resistencia del aire las

distorsiona a formas de paracaí-

Los investigadores descubrieron que, cuando algo se encoge lo suficiente (ya sea das. Cuando la circulación lanza las

un circuito integrado, un motor, una película de lubricante, o un metal individual gotas de lluvia de vuelta al aire,

o un cristal cerámico) deja de actuar como una versión miniatura de su naturaleza con frecuencia repetidamente,

más grande y comienza a comportarse en formas nuevas y diferentes. El metal pa-pueden congelarse y formar grani-

ladio, por ejemplo, que por lo general está compuesto de granos de más o menos zo. Se han registrado granizos que

1,000 nanómetros de tamaño, es cinco veces más fuerte cuando se forma con gra-tienen hasta 178 mm de diámetro.

nos de 5 nanómetros.2 El escalamiento es enormemente importante a medida que más dispositivos se miniaturizan. La nanotecnología funciona en la frontera entre la física, la química, la biología y la ingeniería, y es una frontera donde hay muchos resultados potenciales que todavía no pueden vislumbrarse.

2Un nanómetro es una mil millonésima de metro, de modo que 1,000 nanómetros son una millonésima de metro, o una milésima de milímetro. ¡De veras pequeño!

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)

Enlace atómico. Unión de átomos que forman estructuras más grandes, incluidos los sólidos.

Elasticidad. Propiedad de un material mediante la cual éste cambia de forma cuando una fuerza deformadora actúa sobre él y regresa a su forma original cuando se retira la fuerza.

Ley de Hooke. La cantidad de estiramiento o compresión de un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada: F ~ D x. Cuando se introduce la constante de resorte k, F 5 k D x.

Densidad. La masa de una sustancia por unidad de volumen:

Densidad = masa / volumen

La densidad de peso o peso específico es el peso por unidad de volumen:

Densidad de peso = peso / volumen

Escalamiento. El estudio de cómo el tamaño afecta las relaciones entre el peso, la fuerza y el área superficial.

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N)

12.1 Estructura cristalina

12.5 Arcos

1. ¿De qué manera el arreglo de los átomos de una sustancia

15. ¿Por qué se necesitaron tantas columnas verticales para

cristalina difiere del arreglo de una sustancia no

soportar los techos de los edificios de piedra en los

cristalina?

antiguos Egipto y Grecia?

2. ¿Qué evidencia puedes citar para la naturaleza cristalina

16. ¿Es la tensión o la compresión lo que fortalece un arco

microscópica de ciertos sólidos? ¿Para la naturaleza

que soporta una carga?

cristalina macroscópica?

17. ¿Por qué no se necesita cemento entre los bloques de

12.2 Densidad

piedra de un arco que tiene la forma de una catenaria

invertida?

3. ¿Qué sucede con el volumen de una rebanada de pan que

se oprime? ¿La masa? ¿La densidad?

18. ¿Por qué no se necesitan columnas verticales para

sostener el punto medio de los estadios de domo, como

4. ¿Qué es más denso: un objeto que tiene una densidad de

el Astrodome de Houston?

1,000 kg/m3 o uno que tiene una densidad de 1 g/cm3?

5. El iridio no es el átomo más pesado que se encuentra en

12.6 Escalamiento

la naturaleza. Entonces, ¿qué explica que un trozo de

19. ¿La fuerza del brazo de una persona por lo general

iridio puro sea la sustancia más densa sobre la Tierra?

depende de la longitud del brazo o de su área transversal?

6. ¿Cuál es la densidad de masa del agua? ¿Cuál es la

20. ¿Cuál es el volumen de un cubo de azúcar que mide 1 cm

densidad de peso del agua?

por lado? ¿Cuál es el área transversal del cubo? ¿El área

superficial total?

12.3 Elasticidad

21. Si las dimensiones lineales de un objeto se duplican, ¿en

7. ¿Por qué se dice que un resorte es elástico?

cuánto aumenta el área superficial? ¿En cuánto aumenta

8. ¿Por qué se dice que un trozo de arcilla es inelástico?

el volumen?

9. ¿Cuál es la ley de Hooke? ¿Se aplica a materiales elásticos

22. ¿Qué tiene más piel: un elefante o un ratón? ¿Qué tiene

o a materiales inelásticos?

más piel por unidad de peso corporal: un elefante o un

10. ¿Qué se entiende por el límite elástico de un objeto

ratón?

particular?

23. ¿Qué necesita más alimento por peso corporal

11. Si un objeto de 1 kg estira un resorte 2 cm, ¿cuánto se

diariamente: un elefante o un ratón?

estirará el resorte cuando sostenga un objeto de 3 kg?

24. El dicho "mientras más altos son, más fuerte caen", ¿es

(Supón que el resorte no llega a su límite elástico.)

consecuencia de una razón pequeña o grande de área

12.4 Tensión y compresión

superficial con respecto al volumen?

12. Distingue entre tensión y compresión.

25. ¿Por qué las criaturas pequeñas pueden caer distancias

considerables sin lesionarse, en tanto que las personas

13. ¿Qué es y dónde está la capa neutra en una viga que

necesitan paracaídas para hacer lo mismo?

soporta una carga?

14. ¿Por qué las secciones transversales de las vigas metálicas

tienen forma de letra I en lugar de rectángulos sólidos?

C A PÍ T U LO 12 R E V ISI Ó N

P I E N S A Y R E A L I Z A *(A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 26. Si vives en una región donde cae nieve, recolecta algunos*

en contacto con otras seis. Compara las áreas ocupadas

copos de nieve sobre ropa negra y examínalos con una

por el mismo número de monedas estrechamente empa-

lupa. ¡Tendrás que hacer esto rápidamente! Verás que las

quetadas en ambas formas.

muchas estructuras cristalinas hexagonales están entre los

28. ¿Eres un poco más alto cuando estás acostado que

más hermosos espectáculos de la naturaleza.

cuando estás de pie? Realiza mediciones y observa.

27. Simula un empaquetamiento atómico con más o

29. Sostén un huevo verticalmente y cuelga una pequeña

menos un par de docenas de monedas. Ordénalas en

cadena alrededor de él. ¿Puedes ver que la cadena sigue el

un patrón cuadrado de modo que cada moneda dentro

contorno del huevo: pandeo ligero para el extremo más

del perímetro tenga contacto con otras cuatro. Luego

redondeado y pandeo más profundo para el extremo más

ordénalas hexagonalmente, de modo que cada una esté

puntiagudo? ¡La naturaleza no pasó por alto la catenaria!

P I E N S A Y R E S U E L V E *(A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 30. Demuestra que la densidad de un cilindro sólido de 5 kg,*

34. Un cubo de 2 cm de lado se corta en cubos de 1 cm de

que tiene 10 cm de alto y 3 cm de radio, es 17.7 g/cm3.

lado.

31. ¿Cuál es el peso de un metro cúbico de corcho? ¿Podrías

a. ¿Cuántos cubos resultan?

levantarlo? (Usa 400 kg/m3 para la densidad del corcho.)

b. ¿Cuál era el área superficial del cubo original y cuál

32. Un resorte determinado se estira 6 cm cuando de él

es el área superficial total de los ocho cubos más

se suspende una carga de 30 N. ¿Cuánto se estirará el

pequeños? ¿Cuál es la razón de las áreas superficiales?

resorte si de él se suspenden 50 N (y no llega a su límite

c. Demuestra que la razón de la superficie con respecto al

elástico)?

volumen del cubo más pequeño es el doble de grande

33. Otro resorte se estira 4 cm cuando de él se suspende una

que para el cubo individual de mayor tamaño.

carga de 10 N. ¿Cuánto se estirará el resorte si un resorte

35. Una masa de oro de 19.3 g con forma de cubo mide 1 cm

idéntico también soporta la carga como se muestra en (a)

de largo por cada lado (un poco menor que un cubo de

y (b)? (Desprecia los pesos de los resortes.)

azúcar). ¿Cuál sería la longitud de los lados de un cubo

que tiene el doble de esta masa de oro?

36. En 2009, uno de los paquetes de rescate del gobierno

estadounidense fue de US$700 mil millones cuando

el oro valía US$800 por onza (US$28.40 por gramo).

Calcula la masa en gramos de US$700 mil millones de

?

oro. Si esta cantidad de oro tuviera la forma de un cubo,

¿cuánto mediría cada uno de sus lados?

(a)

?

(b)

***P I E N S A Y C L A S I F I C A** (A N Á L I S I S)*

37. Consulta la Tabla 12.1 y clasifica las densidades de los

38. Considera estos tres animales: A. perro, B. caballo y C.

siguientes materiales de mayor a menor:

elefante. Clasifícalos, de mayor a menor, por sus

a. Agua líquida

a. áreas superficiales.

b. Hielo

b. masas.

c. Aluminio

c. pesos.

d. volúmenes.

e. áreas superficiales por peso.

242

PA R T E D OS

P RO P I EDA D ES D

S D E L A M AT

AT ER I A

***P I E N S A Y E X P L I C A** (S Í N T E S I S)*

39. Tomas 1,000 mg de una vitamina y tu amigo toma 1 g de

56. ¿Una viga I horizontal puede soportar mayor carga

la misma vitamina. ¿Quién toma más vitamina?

cuando el alma es horizontal o cuando el alma es

40. Tu amigo dice que la principal diferencia entre un sólido

vertical? Explica.

y un líquido es el tipo de átomos del material. ¿Estás de

acuerdo o en desacuerdo, y por qué?

41. ¿En qué sentido puedes decir que un árbol es aire

solidificado?

42. El silicio es el principal ingrediente tanto del vidrio

como de los dispositivos semiconductores, aunque las

57. Los dibujos son vistas superiores de un dique para

propiedades físicas del vidrio son diferentes de las de los

contener un lago. ¿Cuál de los dos diseños es preferible?

dispositivos semiconductores. Explica.

¿Por qué?

43. ¿Qué evidencia puedes citar para respaldar la afirmación

de que los cristales están compuestos de átomos que están

ordenados en patrones específicos?

44. ¿Qué sucede con la densidad del aire en un globo de

plástico común cuando se calienta?

45. Compara la densidad de un bloque de hierro de 100 kg

con la densidad de una limadura de hierro.

58. Los extremos “planos” de un barril de madera muy

46. ¿Qué ocurre con la densidad del agua cuando se congela

grande para almacenar vino, ¿deben ser cóncavos

hasta volverse hielo?

(doblados hacia adentro) o convexos (doblados hacia

47. En una inmersión profunda, una bal ena es considerable-

afuera)? ¿Por qué?

men te comprimida por la presión del agua circundante. ¿Qué

ocurre con la densidad de la bal ena durante la inmersión?

48. ¿Cuál tiene más volumen: un kilogramo de oro o un

kilogramo de aluminio?

49. ¿Cuál tiene más masa: un litro de hielo o un litro de agua?

59. Considera dos puentes que sean réplicas exactas uno de otro,

50. ¿Cómo pondrías a prueba la noción de que una bola de

excepto que cada dimensión del puente más grande sea exac-

acero es elástica?

tamente el doble del otro; esto es: doble de largo, elementos

51. ¿Por qué el resorte suspendido se estira más en la parte

estructurales con el doble de grueso, etc. ¿Cuál puente tiene

superior que en la inferior?

más probabilidad de colapsar bajo su propio peso?

60. Sólo con gran dificultad puedes romper un huevo cuando

lo oprimes a lo largo de su eje mayor, pero lo rompes

fácilmente si lo oprimes por los lados. ¿Por qué?

61. Archie diseña un arco con cierto ancho y altura para que

funcione como escultura exterior en un parque. Para lograr

el tamaño y la forma del arco más fuerte posible, suspende

52. Si el resorte del dibujo anterior sostuviera un peso pesado,

una cadena de dos soportes igualmente elevados tan

¿cómo cambiaría el estiramiento?

separados como el ancho del arco y permite que la cadena

53. Cuando doblas un metro, un lado está bajo tensión y el

cuelgue tan bajo como el alto del arco. Luego diseña el

otro está bajo compresión. ¿Cuál lado es cuál?

arco para que tenga exactamente la forma invertida de la

54. Tensión y compresión ocurren en una viga horizontal

cadena colgante. Explica por qué.

parcialmente sostenida cuando se pandea debido a la

gravedad o cuando soporta una carga. Haz un dibujo

simple que muestre un medio para sostener la viga de

modo que la tensión ocurra en la parte superior y la

compresión en la parte inferior. Dibuja otro caso en el

que la compresión esté en la parte superior y la tensión

ocurra en la parte inferior.

55. Supón que construyes un balcón que se extiende fuera del

marco principal de tu casa. En una losa sobresaliente de

concreto, ¿las barras reforzadoras de acero deben incrustarse

en la parte superior, en medio o en la parte inferior de

la losa?

C A PÍ T U LO 12 R E V ISI Ó N

243

62. La fotografía muestra un arco semicircular de piedra.

¿la razón de los metros cuadrados con respecto a los

Observa que debe mantenerse unido con barras de

metros cúbicos aumenta o disminuye?

acero para evitar movimiento hacia afuera. Si la forma

70. ¿Por qué el hielo triturado se funde más rápido que la

del arco no fuera un semicírculo, sino la forma que

misma masa de cubos de hielo?

usó Archie en el ejercicio previo, ¿serían necesarias las

71. ¿Por qué algunos animales se hacen un ovil o cuando tienen

barras de acero? Explica.

frío?

72. ¿Por qué el óxido es un gran problema para las barras de

hierro delgadas que para los pilares de hierro gruesos?

73. ¿Por qué las patatas fritas delgadas se cocinan más rápido

que las patatas fritas gruesas?

74. Si asas hamburguesas y te impacientas, ¿por qué es buena

idea aplanar las hamburguesas para hacerlas más anchas y

más delgadas?

75. ¿Por qué los mitones son más calientes que los guantes en

63. Un dulcero que produce manzanas caramelizadas decide

un día frío? ¿Y qué partes el cuerpo son más susceptibles a

usar 100 kg de manzanas grandes en lugar de 100 kg de

la congelación? ¿Por qué?

manzanas pequeñas. ¿El dulcero necesitará producir más

76. Un ratón tiene más piel por peso corporal que un elefante.

o menos caramelo para cubrir las manzanas?

¿Cómo afecta esto a la cantidad de alimento que come

64. ¿Por qué es más fácil encender un fuego con astil as en lugar

cada criatura?

de con grandes varas y troncos del mismo tipo de madera?

77. Tanto un gorila como un ratón por error caen de un risco

65. ¿Por qué un trozo de carbón arde cuando se enciende, en

de la misma altura. ¿Cómo es que el escalamiento ayuda

tanto que el polvo de carbón explota?

al ratón, pero no al gorila?

66. ¿Por qué una casa de dos pisos que es aproximadamente

78. ¿Cómo se relaciona el escalamiento con el hecho de que el

un cubo sufre menos pérdida de calor que una casa de un

ritmo cardiaco de las criaturas grandes por lo general es más

piso, llena de recovecos, del mismo volumen?

lento que el ritmo cardiaco de las criaturas más pequeñas?

67. ¿Por qué la calefacción es más eficiente en los grandes

79. Los pulmones humanos tienen un volumen de sólo

edificios de departamentos que en las residencias

aproximadamente 4 L, aunque tienen un área superficial

unifamiliares?

interna de casi 100 m2. ¿Por qué esto es importante y

cómo es posible?

68. Algunas personas con conciencia ambiental construyen

sus casas con forma de domo. ¿Por qué hay menos pérdida

80. ¿Qué tiene que ver el concepto de escalamiento con el

de calor en una residencia con forma de domo que en una

hecho de que las células vivas de una ballena tengan

residencia convencional con el mismo volumen?

aproximadamente el mismo tamaño que las de un ratón?

69. A medida que el volumen de un objeto aumenta, su área

81. ¿Cuáles caen más rápido: las gotas de lluvia grandes o las

superficial también aumenta. Durante este incremento,

pequeñas?

***P I E N S A Y D I S C U T E** (E V A L U A C I Ó N)*

82. ¿El hierro necesariamente es más pesado que el corcho?

86. Si usas una cantidad específica de masa para cupcakes y

Explica.

los horneas durante el tiempo sugerido para un pastel,

83. El átomo de uranio es el más pesado y más masivo entre

¿cuál será el resultado?

los elementos que ocurren de manera natural. ¿Por qué

87. La nutrición se obtiene de los alimentos a través del área

entonces una barra sólida de uranio no es el metal más

superficial interior de los intestinos. ¿Por qué un pequeño

denso?

organismo, como un gusano, tiene un tubo digestivo

84. ¿Por qué crees que las vigas con tanta frecuencia se

simple y relativamente recto, en tanto que un organismo

acomodan para formar triángulos en la construcción de

grande, como un ser humano, tiene un tubo digestivo

puentes y otras estructuras? (Compara la estabilidad de

complejo y ampliamente plegado?

tres varas clavadas para formar un triángulo con cuatro

88. ¿Cuál es la ventaja de que un gimnasta tenga baja estatura?

varas clavadas para formar un rectángulo, o cualquier

89. ¿Quién tiene más necesidad de beber en un clima

número de varas para formar figuras geométricas de

desértico seco: un niño o un adulto?

múltiples lados. ¡Pruébalo y observa!)

90. ¿Por qué un colibrí no se eleva como un águila y un

85. Una soga gruesa es más fuerte que una soga delgada del

águila no bate sus alas como un colibrí?

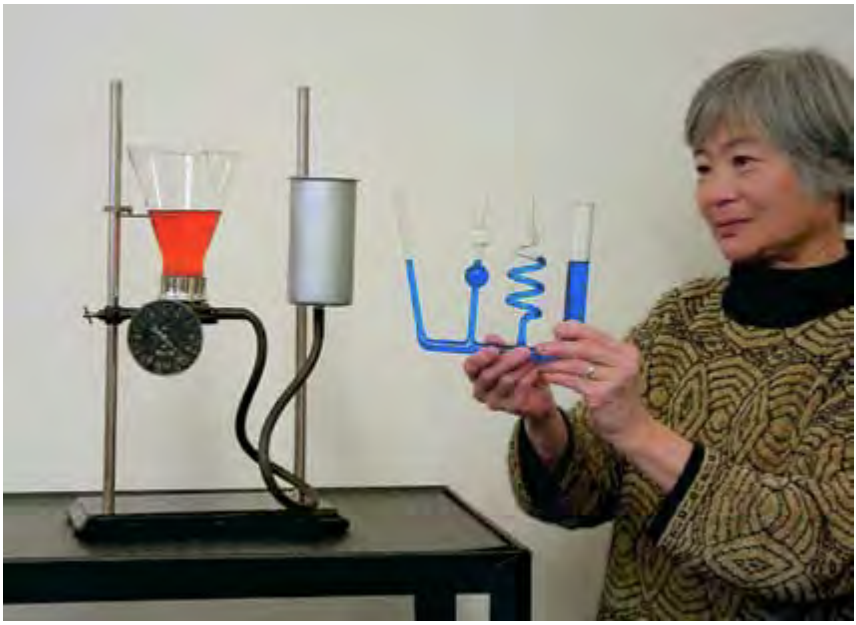
mismo material. ¿Una soga larga es más fuerte que una

91. ¿Puedes relacionar la idea del escalamiento con el

soga corta?

gobierno de grupos pequeños frente a grupos grandes de

ciudadanos? Explica.



13 ***1***

C A P Í T U L O 1 3

Líquidos ***2***

13.1 Presión

3

13.2 Presión de un líquido

13.3 Flotabilidad

13.4 Principio de Arquímedes

13.5 ¿Qué hace que un objeto se hunda o flote?

13.6 Flotación

13.7 Principio de Pascal

13.8 Tensión superficial

13.9 Capilaridad

4

1 *La profundidad del agua por arriba del nivel del suelo en la torre garantiza una presión de agua importante y confiable a las*

muchas viviendas que atiende. ***2*** *Cuando les muestra los vasos de Pascal, Tsing Bardin pregunta a sus alumnos cuál es la relación*

entre los mismos niveles de agua coloreada y el dicho de que "las

aguas buscan su nivel". ***3*** *La Falkirk Wheel de Escocia levanta botes 18 m con facilidad desde un cuerpo de agua más bajo hasta*

uno más alto. Mientras una góndola llena de agua gira hacia arriba,

la otra gira hacia abajo, siempre en equilibrio sin importar el peso

de los botes que pueda o no transportar. ***4*** *El autor del libro de texto de física, Ray Serway, juega con la tensión superficial.*

C A PÍ T U LO 13 L Í Q U I DOS

245

Blaise Pascal fue un destacado científico, escritor y teólo- Para responder a los argumentos de que tenía que haber go del siglo XVII. Mientras investigaba la física de los

alguna materia invisible en el espacio vacío, Pascal apeló al

fluidos, inventó la prensa hidráulica, que utiliza pre-

método científico y respondió: “Para demostrar que una

sión hidráulica para multiplicar una fuerza. También inventó

hipótesis es evidente, no es suficiente con que todos los fenó-

la jeringa. La notoriedad de Pascal creció por su comentario

menos se desprendan de el a; más bien, si conduce a algo

acerca de la experimentación con barómetros realizada por

que contradice a uno solo de los fenómenos, eso es suficiente

Evangelista Torricel i. Pascal cuestionó qué fuerza mantenía

para establecer su falsedad”. Su insistencia en la existencia del

al mercurio en el tubo y qué llenaba el espacio encima del

vacío también creó conflicto con otros prominentes científi-

mercurio en el tubo. La mayoría de los científicos de la época,

cos, como Descartes.

en el espíritu de Aristóteles, no creían que fuera posible un

El trabajo de Pascal con la hidráulica lo condujo a lo que

vacío y pensaban que alguna materia invisible estaba presente

ahora se denomina el principio de Pascal, es decir, un cam-

en el “espacio vacío”. Pascal realizó nuevos experimentos y bio de presión en cualquier punto de un fluido encerrado en sostuvo que, en efecto, un cuasivacío ocupaba el espacio enci-reposo se transmite sin disminución a todos los puntos del

ma de la columna de líquido del tubo del barómetro.

fluido. Sogas y poleas cedieron su lugar a este principio, pues

Pascal, quien tuvo mala los dispositivos hidráulicos multiplican fuerzas inimagina-salud toda su vida, convenció

bles antes de la época de Pascal.

a su cuñado de transportar

Aunque teólogo devoto, Pascal discrepaba de algunos de

un barómetro por la pendien-

los dogmas de la época. Algunos de sus escritos sobre reli-

te de una alta montaña para gión fueron prohibidos por la Iglesia. Como científico, es investigar el efecto que tenía recordado por la hidráulica que luego cambió el panorama sobre el nivel del mercurio tecnológico; como teólogo, es recordado por sus muchas del tubo. Como Pascal hipo- aseveraciones, una de las cuales guarda relación con siglos

tetizó, el nivel de mercurio de humanidad: "Los hombres nunca hacen el mal tan com-descendió con el aumento de

pleta y alegremente como cuando lo hacen por convicciones

altitud. Pascal realizó una ver-

religiosas".

sión más modesta del experi-

En la actualidad, en honor a sus aportaciones científi-

mento y llevó un barómetro a

cas, el nombre de Pascal se asignó a la unidad del SI de

lo alto del campanario de una iglesia, a una altura aproxima-

presión y a un lenguaje de programación de computadoras.

da de 50 metros. De nuevo, el nivel de mercurio descendió,

En la literatura, Pascal es considerado uno de los autores

pero no tanto. Éste y otros experimentos de Pascal fueron

más importantes de mediados del siglo XVII. Su uso de la

elogiados en toda Europa, pues establecían el principio y el

sátira y la sabiduría popular ha influido a escritores de todo

valor del barómetro.

el mundo.

***13.1** Presión*

Un líquido contenido en un recipiente ejerce fuerzas contra las paredes del recipiente.

Para estudiar la interacción entre el líquido y las paredes, es conveniente introducir el concepto de presión. La ***presión*** *es una fuerza dividida entre el área sobre la que se ejerce la fuerza:1*

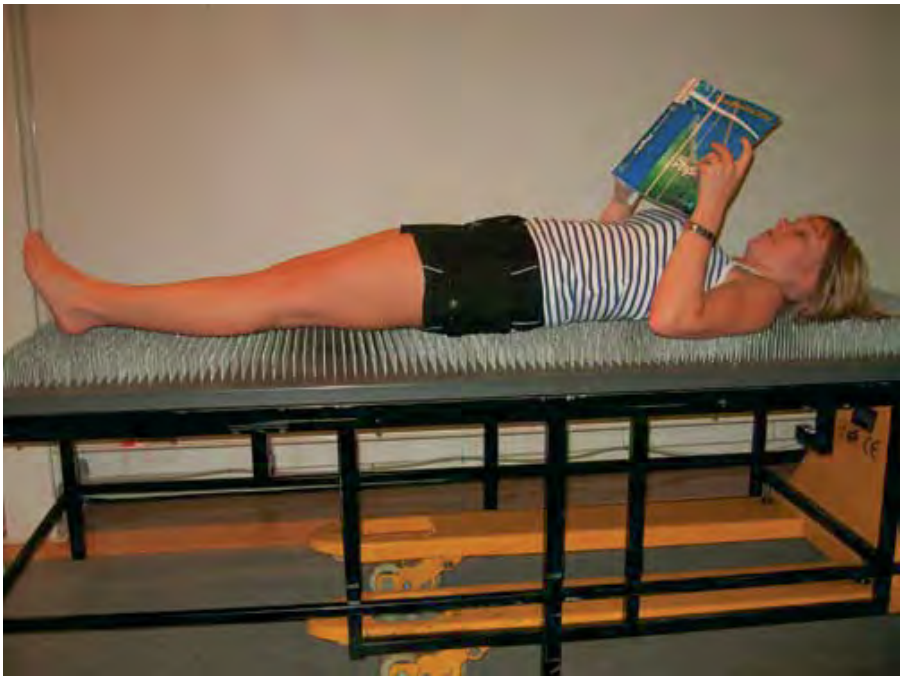
Presión = fuerza

área

Para ilustrar la diferencia entre presión y fuerza, observa los dos bloques de la Fi- ***F I G U R A 13 .1***

gura 13.1. Los bloques son idénticos, pero uno está de pie sobre su extremo y el otro Si bien el peso de ambos bloques es el descansa sobre su costado. Ambos bloques tienen igual peso y, por tanto, ejercen la mismo, el bloque erguido ejerce mayor misma fuerza sobre la superficie (cada uno registraría lo mismo sobre una báscula de presión contra la mesa.

1La presión puede medirse en cualquier unidad de fuerza dividida entre cualquier unidad de área. La unidad de presión estándar internacional (SI), el newton por metro cuadrado, se denomina pascal (Pa). Una presión de 1 Pa es muy pequeña y aproximadamente igual a la presión ejercida por un billete de dólar que descansa plano sobre una mesa. Los escritos científicos usan con más frecuencia el kilopascal (1 kPa 5 1,000 Pa).



F I G U R A 1 3 . 2

La física Sarah Blomberg yace sobre la

cama de clavos sin sufrir daño porque

su peso se distribuye sobre cientos de

clavos, lo que hace que la presión en la

punta de cada clavo sea pequeña y no

plantee peligro. La foto del recuadro

muestra la manzana que se ha dejado

caer y da testimonio de lo afilado de los

clavos.

baño), pero el bloque erguido ejerce mayor presión contra la superficie. Si el bloque se inclinara de modo que su contacto con la mesa fuese sobre una sola esquina, la presión sería todavía mayor.

***13.2** Presión de un líquido*

Cuando nadas bajo el agua, puedes sentir la presión del agua que actúa contra tus tímpanos. Cuanto más profundo nadas, mayor es la presión. La presión que sientes se ***SCREENCAST: Presión de un líquido***

debe al peso del agua sobre ti. A medida que nadas a mayor profundidad, hay más agua arriba de ti y, por tanto, mayor presión. La presión que ejerce un líquido depende de su profundidad.

La presión de un líquido también depende de la densidad del líquido. Si te sumergie-ras en un líquido más denso que el agua, la presión sería proporcionalmente mayor. La Las moléculas que constituyen un

presión debida a un líquido es precisamente igual al producto de la densidad de peso y líquido pueden fluir al deslizarse

la profundidad:2

unas sobre otras. Un líquido adop-

ta la forma de su recipiente. Sus

Presión del líquido densidad de peso profundidad

moléculas están muy juntas y resis-

Dicho de una manera sencilla: la presión que un líquido ejerce contra los lados y el ten muy bien las fuerzas compresivas, de modo que los líquidos, al

fondo de un recipiente dependen de la densidad y la profundidad del líquido. Si desigual que los sólidos, son difíciles

precias la presión atmosférica, al doble de profundidad, la presión del líquido contra el de comprimir.

fondo es del doble; a tres veces la profundidad, la presión del líquido es del triple; y así 2Esta ecuación se deriva de las definiciones de presión y densidad de peso. Considera un área en el fondo de un recipiente de líquido. El peso de la columna de líquido directamente encima de esta área produce presión. De acuerdo con la definición,

peso

Densidad de peso = volumen

puedes expresar este peso de líquido como

Peso densidad de peso volumen,

donde el volumen de la columna es simplemente el área multiplicada por la profundidad. Entonces se obtiene: fuerza

peso

densidad de peso ×

densidad de peso ×

volumen

(área × profundidad)

Presión =

=

=

=

área

área

área

área

$= densidad\ de\ peso \times profundidad$

Para la presión total, a esta ecuación se le agrega la presión debida a la atmósfera sobre la superficie del líquido.

sucesivamente. O, si el líquido es dos o tres veces más denso, la presión del líquido es respectivamente dos o tres veces mayor para cualquier profundidad dada. Los líquidos son prácticamente incompresibles; es decir, es muy difícil que su volumen cambie con la presión (el volumen del agua disminuye sólo 50 millonésimas de su volumen original por cada atmósfera de aumento de presión). De modo que, excepto por pequeños cambios producidos por la temperatura, la densidad de un líquido en particular prácticamente es la misma a cualquier profundidad.3

Si presionas la mano contra una superficie, y alguien más presiona contra tu mano en la misma dirección, entonces la presión contra la superficie es mayor que si tú presionaras solo. Lo mismo ocurre con la presión atmosférica que presiona sobre la superficie de un líquido. Entonces, la presión total de un líquido es la densidad de peso multiplicada por la profundidad más la ***F I G U R A 1 3 . 3***

presión de la atmósfera. Cuando esta distinción sea importante, se usará el término pre- Para la jirafa no es problema que la presión total. De lo contrario, cuando se hable de la presión de un líquido se estará haciendo sión del líquido dependa de la profun-referencia a la presión sin importar la presión atmosférica que por lo general siempre está didad porque tiene un corazón grande y un intrincado sistema de válvulas y presente (en el siguiente capítulo aprenderás más acerca de la presión atmosférica).

vasos sanguíneos elásticos y absorbentes

Es importante reconocer que la presión no depende de la cantidad de líquido pre- en el cerebro. Sin dichas estructuras, sente. El volumen no es la clave, la profundidad sí lo es. La presión promedio del agua la jirafa se desvanecería cuando elevara que actúa contra una presa depende de la

profundidad promedio del agua, no del volu- súbitamente la cabeza, y estaría sujeta a men de agua que contenga, como se muestra en la Figura 13.4.

hemorragias cerebrales cuando la bajara.

Lago grande pero

Estanque

3 m

poco profundo

pequeño

pero

F I G U R A 1 3 . 4

profundo

6 m

El gran lago poco profundo sólo ejerce

la mitad de la presión promedio que

ejerce el pequeño estanque profundo.

Sentirás la misma presión si sumerges la cabeza un metro bajo la superficie del agua en una pequeña alberca que si lo haces a la misma profundidad en medio de un gran lago. Lo mismo sucede con un pez. Observa los vasos comunicantes de la Figura 13.5. Si sostienes un pez dorado por la cola y sumerges su cabeza un par de centímetros bajo la superficie, la presión del agua sobre la cabeza del pez será ***VIDEO: Presa***

F I G U R A 1 3 . 5

La presión del líquido es la misma

con cualquier profundidad dada bajo

la superficie, sin importar la forma

del vaso contenedor. Presión del

líquido 5 densidad de peso 3 profun-

didad (para la presión total, agrega la

presión del aire en la parte superior).

3La densidad del agua dulce es 1,000 kg/m3. Dado que el peso (mg) de 1,000 kg es 1,000 10 N/kg 10,000 N, la densidad de peso del agua es 10,000 newtons por metro cúbico (o, con mayor precisión, 9,800 N/kg, si usas g 9.8 N/kg). La presión del agua bajo la superficie de un lago es simplemente igual a esta densidad multiplicada por la profundidad en metros. Por ejemplo, la presión del agua es 10,000 N/m2 a una profundidad de 1 m y 100,000 N/m2 a una profundidad de 10 m. En unidades del SI, la presión se mide en pascales, de modo que esto sería 10,000 Pa y 100,000 Pa, respectivamente; o, en kilopascales, 10 kPa y 100 kPa, respectivamente. Para la presión total en estos casos, agrega la presión de la atmósfera, 101.3 kPa.

la misma en cualquiera de los vasos. Si sueltas al pez y éste nada algunos centímetros más profundo, la presión sobre el pez aumentará con la profundidad y será la misma sin importar en cuál vaso esté. Si el pez nada hasta el fondo, la presión será mayor, pero no hay diferencia en cuál vaso

nade. Todos los vasos están llenos hasta profundidades iguales, de modo que la presión del agua es la misma en el fondo de cada vaso, sin importar su forma o volumen. Si la presión del agua en el fondo de un vaso fuese mayor que la presión del agua en el fondo de un vaso vecino más estrecho, la mayor presión forzaría el agua hacia los lados y entonces subiría el vaso más estrecho a un nivel superior hasta que las presiones en el fondo se igualaran.

Pero esto no ocurre. La presión depende de la profundidad, no del volumen, y así se ve que hay una razón por la que el agua busca su propio nivel.

El hecho de que el agua busque su nivel puede demostrarse si llenas una manguera con agua y sostienes los dos extremos a la misma altura. Los niveles del agua serán iguales. Si un extremo se eleva más que el otro, el agua saldrá del extremo más bajo, No todos los romanos de la

Antigüedad creían que el agua

incluso si tiene que fluir "cuesta arriba" parte del camino. Este hecho no lo com-no podía fluir colina arriba, como

prendieron del todo algunos de los antiguos romanos, quienes construyeron elabora-lo demuestran algunos de los

dos acueductos con arcos altos y rutas tortuosas para garantizar que el agua siempre sistemas de tuberías de aquellas

fluyera ligeramente hacia abajo en cada lugar a lo largo de su ruta desde el depósito épocas que corrían tanto hacia

hasta la ciudad. Si las tuberías se tendieran en el suelo y siguieran el contorno natural arriba como hacia abajo.

del terreno, en algunos lugares el agua tendría que fluir cuesta arriba, y los romanos eran escépticos de esto. Todavía no se acostumbraba la experimentación cuidadosa, de modo que, con mucha mano de obra esclava, los romanos construyeron acueductos innecesariamente elaborados.

FIGURA 13.6

Los acueductos romanos garantizaban

que el agua fluyera ligeramente colina

abajo desde el depósito hasta la ciudad.

Un hecho determinado experimentalmente acerca de la presión del líquido es que se ejerce por igual en todas direcciones. Por ejemplo, si te sumerges en el agua, sin importar en qué forma inclines la cabeza, sentirás la misma cantidad de presión del agua en los oídos. Puesto que un líquido puede fluir, la presión no sólo es hacia abajo.

Se sabe que la presión también actúa hacia los lados cuando ves el agua borbotear en sentido lateral por una fuga en el costado de una lata erguida. Se sabe que la presión también actúa hacia arriba cuando intentas empujar una pelota de playa bajo la superficie del agua. El fondo de un bote ciertamente es empujado hacia arriba por la presión ***F I G U R A 1 3 . 7***

del agua.

Las fuerzas de un líquido que presiona

Cuando el líquido presiona contra una superficie, hay una fuerza neta que es perpen-contra una superficie se suman para dar

una fuerza neta que es perpendicular a

dicular a la superficie. Aunque la presión no tiene una dirección específica, la fuerza sí la superficie.

la tiene. Observa el bloque triangular de la Figura 13.7. Centra tu atención sólo en los tres puntos a medio camino a lo largo de cada superficie. El agua es forzada contra cada

punto desde muchas direcciones, de las cuales sólo se indican algunas. Los componentes de las fuerzas que no son perpendiculares a la superficie se cancelan entre sí y sólo dejan una fuerza perpendicular neta en cada punto.

Por eso el agua que borbotea de un agujero en una cubeta al principio sale de la cubeta en una dirección en ángulo recto con respecto a la superficie de la cubeta en la que se ubica el agujero. Luego se curva hacia abajo debido a la gravedad. La fuerza que ejerce un fluido sobre una superficie lisa siempre es en ángulos rectos con respecto a la superficie.4

F I G U R A 1 3 . 8

Los vectores de fuerza actúan en sentido

P U N T O D E C O N T R O L

perpendicular a la superficie interna

del recipiente y aumentan con la

Imagina que levantas un pie cuando estás de pie sobre una báscula de baño.

profundidad.

¿La presión que ejerces sobre la báscula cambia? ¿Hay una diferencia en la lectura de la báscula?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

Cuando desplazas tu peso al pararte en un pie, la presión sobre la

superficie de la báscula se duplica. Pero la báscula no mide presión, mide peso. Excepto por algunas sacudidas mientras desplazas tu peso, la lectura de la báscula permanece igual.

VIDEO: Flotabilidad

***13.3** Flotabilidad*

Quienquiera que haya sacado del agua un objeto pesado sumergido, estará familiarizado con la flotabilidad, la aparente pérdida de peso experimentada por los objetos sumergidos en un líquido. Por ejemplo, levantar una gran roca desde el fondo del banco de un río es una tarea relativamente sencilla en tanto la roca esté por debajo de la superficie.

*Sin embargo, cuando la roca se levanta por encima de la superficie, la fuerza necesaria **F I G U R A 1 3 . 9***

La presión mayor contra el fondo de un

para levantarla es mucho mayor. Es por esto que, cuando la roca está sumergida, el agua objeto sumergido produce una fuerza de ejerce una fuerza ascendente sobre ella que se opone exactamente a la dirección del jalón flotación ascendente.

*de la gravedad. Esta fuerza ascendente se llama **fuerza de flotación** (conocida también como empuje hidrostático o fuerza boyante), y es una consecuencia del aumento de la presión con la profundidad. La Figura 13.9 muestra por qué la fuerza de flotación actúa hacia arriba. Las fuerzas debidas a la presión del agua se ejercen en todas partes contra la roca en una dirección perpendicular a su superficie, como se muestra por los vectores.*

*Los vectores de fuerza contra los lados a iguales profundidades se cancelan entre sí, de modo que no hay fuerza de flotación horizontal. Sin embargo, los vectores de fuerza en la dirección vertical no se cancelan. La presión es mayor contra el fondo de la roca porque el fondo está más profundo. De modo que las fuerzas ascendentes contra el fondo son mayores que las fuerzas descendentes contra la parte superior, lo que produce una **F I G U R A 13 .10***

fuerza neta ascendente: la fuerza de flotación.

Cuando una piedra está sumergida,

Para comprender la flotabilidad es indispensable comprender la expresión "volumen desplaza el agua que tiene un volumen de agua desplazada". Si

una piedra se coloca en un recipiente que está lleno de agua igual al volumen de la piedra.

hasta el borde, parte del agua se desbordará (Figura 13.10). La piedra desplaza el agua.

Un poco de razonamiento te dirá que el volumen de la piedra (es decir, la cantidad de Agua desplazada

espacio que ocupa) es igual al volumen del agua desplazada. Si colocas cualquier objeto en un recipiente parcialmente lleno de agua, el nivel de la superficie se eleva (Figura 13.11). ¿En cuánto? Exactamente en la misma cantidad que si un volumen de agua se vertiera en él e igualara el volumen del objeto sumergido. Éste es un buen método para determinar el volumen de objetos con forma irregular: un objeto completamente sumergido siempre desplaza un volumen de líquido igual a su propio volumen.

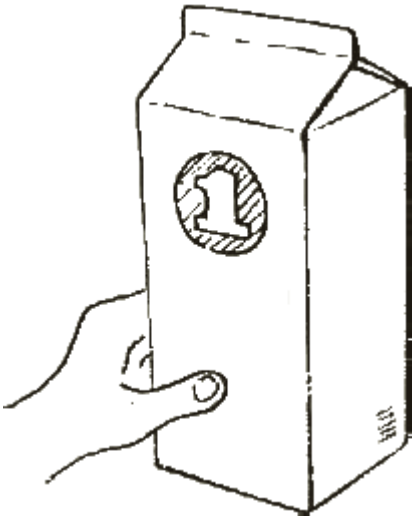
F I G U R A 1 3 . 1 1

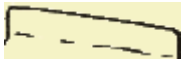
4La rapidez de salida del líquido por el orificio es 2 gh , donde h es la profundidad bajo la superficie libre. Es El aumento del nivel del agua es el

"

interesante que ésta es la misma rapidez que adquiriría el agua (o cualquier cosa) si cayera libremente la misma mismo que si vertieras un volumen de distancia vertical h.

agua igual al volumen de la piedra.





250

PA R T E D OS

P RO P I EDA D ES D E L A M AT ER I A

P U N T O D E C O N T R O L

Una receta requiere una cantidad específica de mantequilla. ¿Cuál es la relación entre el método de desplazamiento y el uso de una taza medidora SCREENCAST: Flotabilidad

de cocina?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Coloca un poco de agua en la taza antes de agregar la mantequilla. Observa la lectura del nivel del agua en un costado de la taza. Luego agrega la mantequilla y observarás que el nivel del agua se eleva. Puesto que la mantequilla flota, ponla bajo la superficie. Cuando restes la lectura del nivel inferior de la lectura del nivel superior, conocerás no sólo el volumen del agua desplazada, sino también el volumen de la mantequilla.

13.4 *Principio de Arquímedes*

Si metes el pie en el agua, está

La relación entre la flotabilidad y el líquido desplazado la descubrió el científico griego inmerso. Si saltas al agua y te hun-Arquímedes en el siglo III a. C. Se plantea de la siguiente manera:

des bajo la superficie, la inmersión

es total y estás sumergido.

Un objeto inmerso es sostenido por una fuerza igual al peso del fluido que desplaza.

Esta relación se llama ***principio de Arquímedes****. Se aplica a líquidos y gases, ambos fluidos. Si un objeto inmerso desplaza 1 kg de fluido, la fuerza de flotación que actúa sobre él es igual al peso de 1 kg.5 Por inmerso, se entiende o completa o parcialmente sumergido. Si sumerges a la mitad en agua un contenedor sellado de 1 L, desplazará medio litro de agua y será sostenido por una fuerza igual al peso de medio litro de agua, sin importar qué haya en el contenedor. Si lo sumerges por completo será sostenido por una fuerza igual al peso de un litro de agua (1 kg de masa). Si el contenedor está totalmente sumergido y no se comprime, la fuerza de flotación igualará el peso de 1 kg de agua a cualquier profundidad. Esto se debe a que, a cualquier profundidad, el contenedor no puede desplazar más volumen de agua que su propio volumen. Y el peso de esta agua desplazada (¡no el peso del objeto sumergido!) es igual a la fuerza de flotación.*

F I G U R A 1 3 . 1 2

Si un objeto de 30 kg desplaza 20 kg de fluido en la inmersión, su peso aparente Un litro de agua ocupa un volumen

será igual al peso de 10 kg (100 N). Observa que, en la Figura 13.13, el bloque de de 1,000 cm3, tiene una masa de 1 kg y

3 kg tiene un peso aparente igual al peso de un bloque de 1 kg cuando se sumerge.

pesa 10 N (o, más precisamente, 9.8 N).

El peso aparente de un objeto sumergido es su peso usual en aire menos la fuerza de En consecuencia, su densidad puede

flotación.

expresarse como 1 kg/L y su densidad de

peso como 10 N/L. (El agua de mar es

un poco más densa.)

0

3

2

1

F I G U R A 1 3 . 1 3

Los objetos pesan más en el aire que en el

agua. Cuando un bloque de 3 kg se sumer-

ge, la lectura de la báscula disminuye a

VIDEO: Principio de Arquímedes

1 kg. El peso "faltante" es igual al peso de

los 2 kg de agua desplazados, que es igual

a la fuerza de flotación.

5En el laboratorio, tal vez sea conveniente expresar la fuerza de flotación en kilogramos, aun cuando un kilogramo sea una unidad de masa y no una unidad de fuerza. Así que, estrictamente hablando, la fuerza de flotación ***SCREENCAST: Arquímedes***

es el peso de 1 kg, que es 10 N (o, más preciso, 9.8 N). O también podrías decir que la fuerza de flotación es 1 kilogramo peso, no simplemente 1 kg.

C A PÍ T U LO 13 L Í Q U I DOS

Quizás tu profesor resuma el principio de Arquímedes con algún ejemplo numérico para mostrar que la diferencia entre las fuerzas que actúan hacia arriba y hacia abajo debida a similares diferencias de presión sobre un cubo sumergido es numéricamente idéntica al peso del fluido desplazado. Si la densidad es casi constante, como lo es para la mayoría de los líquidos, no representa ninguna diferencia cuán profundo se coloque el cubo. Si bien la presión aumenta con la profundidad, la diferencia entre la presión ascendente contra el fondo del cubo y la presión descendente contra la parte superior del cubo es la misma a cualquier profundidad (Figura 13.14). Cualquiera sea la forma del cuerpo sumergido, la fuerza de flotación es igual al peso del fluido desplazado.

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Verdadero o falso? El principio de Arquímedes dice que cualquier objeto que desplaza 10 N de líquido tendrá una fuerza de flotación ascendente de 10 N.

2. Un recipiente de 1 L completamente lleno de plomo tiene una masa de 11.3 kg y se sumerge en agua. ¿Cuál es la fuerza de flotación que actúa sobre él?

3. Conforme una roca lanzada hacia un lago profundo se hunde cada vez más en el agua, ¿la fuerza de flotación sobre él aumenta o disminuye?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Verdadero. Sólo cuenta el peso del líquido desplazado. (Considéralo también a la luz de la tercera ley de Newton: si el objeto sumergido empuja hacia los lados 10 N de fluido, el fluido desplazado reacciona al empujar de vuelta sobre el objeto sumergido con 10 N.)*

F I G U R A 1 3 . 1 4

2. *La fuerza de flotación es igual al peso del litro de agua desplazado, ¡no el peso del La diferencia entre las fuerzas ascenden-plomo! Un L de agua tiene una masa de 1 kg y pesa 10 N. De modo que la fuerza de te y descendente que actúan sobre el blo-flotación sobre él es 10 N.*

que sumergido es la misma a cualquier

3. *La fuerza de flotación permanece invariable a medida que la roca se hunde, profundidad.*

porque la roca desplaza el mismo volumen y el mismo peso de agua a cualquier profundidad.

***13.5** ¿Qué hace que un objeto se hunda o flote?*

Es importante recordar que la fuerza de flotación que actúa sobre un objeto sumergido depende del volumen del objeto. Los objetos pequeños desplazan cantidades pequeñas de agua y sobre ellos actúan fuerzas pequeñas de flotación. Los objetos grandes desplazan cantidades grandes de agua y sobre ellos actúan fuerzas de flotación más grandes. Es el volumen del objeto sumergido, no su peso, el que determina la fuerza de flotación. La ***SCREENCAST: Flotabilidad sobre***

un submarino

fuerza de flotación es igual al peso del volumen de fluido desplazado. (La mala interpretación de esta idea es la raíz de mucha de la confusión que tiene la gente acerca de la flotabilidad.)

Sin embargo, el peso de un objeto sí es importante en la flotación. Que un objeto se hunda o flote en un líquido depende de cómo la fuerza de flotación se compara con el peso del objeto. Esto, a su vez, depende de la densidad del objeto. Ten en cuenta estas tres reglas simples:

SCREENCAST: Más acerca

de la flotabilidad

1. Un objeto más denso que el fluido en el que esté sumergido se hundirá.

2. Un objeto menos denso que el fluido en el que esté sumergido flotará.

3. Un objeto que tenga una densidad igual a la densidad del fluido en el que está sumergido ni se hundirá ni flotará.

PA R T E D OS

P RO P I EDA D ES D E L A M AT ER I A

La regla 1 parece suficientemente razonable, porque los objetos más densos que el agua se hunden hasta el fondo, sin importar la profundidad del agua. Los buzos cerca Las personas que no pueden flotar

del fondo de los cuerpos de agua profundos en ocasiones pueden encontrar un trozo de son, 9 de cada 10 veces, hombres.

madera hundido que merodea por encima del suelo marino (con una densidad igual a La mayoría de los hombres son

la del agua a dicha profundidad), ¡pero nunca encuentran rocas flotantes!

más musculosos y un poco más

De acuerdo con las reglas 1 y 2, ¿qué puedes decir acerca de las personas que, por densos que las mujeres. Asimis-más que intentan, no pueden flotar? ¡Simplemente son muy densas! Para flotar con más mo, las latas de gaseosa de dieta

facilidad, debes reducir tu densidad. La fórmula densidad de peso 5 peso/ volumen dice flotan, en tanto que las latas de

que debes o reducir tu peso o aumentar tu volumen. Usar un chaleco salvavidas aumenta gaseosa regular se hunden en el

agua. ¿Qué te dice esto acerca de

el volumen al tiempo que agrega, consecuentemente, muy poco a tu peso. Reduce tu sus densidades relativas?

densidad total.

La regla 3 se aplica a los peces, que ni se hunden ni flotan. Por lo general, un pez tiene la misma densidad que el agua. Un pez puede regular su densidad al expandir y contraer un saco de aire en su cuerpo que cambia su volumen. El pez puede moverse hacia arriba al aumentar su volumen (lo que reduce su densidad) y hacia abajo al contraer su volumen (lo que aumenta su densidad).

Para un submarino, el peso, no el volumen, varía para lograr la densidad deseada. Los tanques de lastre toman o sacan agua. De igual modo, la densidad total de un cocodrilo aumenta cuando traga piedras. En los estómagos de cocodrilos grandes se han encontrado de 4 a 5 kg de piedras. Debido a este aumento de densidad, el cocodrilo nada más bajo en el agua y, por tanto, se descubre menos ante su presa (Figura 13.15).

FIGURA 13.15

(Izquierda) Un cocodrilo que se acerca

hacia ti en el agua. (Derecha) Un coco-

drilo con piedras que se acerca hacia ti

en el agua.

PUNTO DE CONTROL

1. Dos bloques sólidos de idéntico tamaño se sumergen en agua. Un bloque es plomo y el otro es aluminio. ¿Sobre cuál es mayor la fuerza de flotación?

2. Si un pez se hace más denso, se hundirá; si se hace menos denso, se elevará. En términos de fuerza de flotación: ¿por qué esto es así?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. *La fuerza de flotación es la misma sobre ambos bloques porque desplazan el mismo volumen de agua. Para objetos sumergidos, la fuerza de flotación está determinada sólo por el volumen de agua desplazada, no por el peso del objeto.*

2. *Cuando el pez se vuelve más denso, al reducir su volumen, desplaza menos agua, de modo que la fuerza de flotación disminuye. Cuando el pez se vuelve menos denso al expandir su volumen, se desplaza más agua y la fuerza de flotación aumenta.*

13.6 Flotación

Los pueblos antiguos fabricaban sus botes con madera. ¿Podrían haber

Fuerza de

diseñado un barco de hierro? No se sabe. La idea de que el hierro flotara flotación

quizás les parecía extraña. En la actualidad es fácil entender cómo puede flotar un barco hecho de hierro.

Imagina un bloque de 1 ton de hierro sólido. Puesto que el hierro es

casi ocho veces más denso que el agua, el bloque sólo desplaza 1/8 ton de agua cuando se sumerge, lo que no es suficiente para mantenerlo a flote.

Supón que das una nueva forma al mismo bloque de hierro y lo conviertes Peso del hierro

en un tazón (Figura 13.16). Todavía pesa 1 ton. Pero, cuando lo pones en el agua, desplaza un mayor volumen de agua que cuando era un bloque.

Cuanto más profundo se sumerja el tazón de hierro, más agua desplazará **FIGURA 13.16**

y mayor será la fuerza de flotación que actúe sobre él. Cuando la fuerza de Un bloque de hierro se hunde, mientras que la misma flotación sea igual a 1 ton, el tazón ya no se hundirá más.

cantidad de hierro con forma de tazón flota.

Cuando cualquier bote desplaza un peso de agua igual a su propio peso, flota. A esto se le denomina ***principio de flotación***:

Un objeto que flota desplaza un peso de fluido igual a su propio peso.

Todo barco, todo submarino y todo dirigible debe estar diseñado para desplazar un peso de fluido igual a su propio peso. Por ende, un barco de 10,000 ton debe construirse del ancho suficiente para desplazar 10,000 ton de agua antes de hundirse demasiado en el agua. Lo mismo sucede con las naves en el aire. Un dirigible que pesa **VIDEO: Flotación**

100 ton desplaza al menos 100 ton de aire. Si desplaza más, se eleva; si

desplaza menos, se cae. Si desplaza exactamente su peso, flota a una altitud constante.

FIGURA 13.17

El peso de un objeto que flota es igual

al peso del agua desplazada por la parte

sumergida.

Para un volumen dado de fluido desplazado, un fluido más denso ejerce una mayor fuerza de flotación que un fluido menos denso. Por tanto, un barco flota más alto en agua salada que en agua dulce porque el agua salada es un poco más densa. De igual modo, un trozo sólido de hierro flotará en mercurio, aun cuando se hunda en agua.

La física de la Figura 13.18 es utilizada bastante bien por la Falkirk Wheel, un elevador giratorio de botes excepcional que sustituyó una serie de 11 exclusas en Escocia.

Conectadas a su rueda de 35 m de alto hay dos góndolas rebosantes de agua. Cuando uno o más botes entran en una góndola, el agua que se desborda pesa exactamente tanto como los botes. De modo que las góndolas llenas de agua siempre pesan lo mis- ***FIGURA 13.18***

mo ya sea que transporten botes o no, y la rueda siempre permanece equilibrada. Por Un objeto flotante desplaza un peso de tanto, a pesar de su enorme masa, la rueda gira cada media revolución con muy poco fluido igual a su propio peso.

suministro de energía.

FIGURA 13.19

La Falkirk Wheel tiene dos góndolas

equilibradas llenas de agua, una que

sube y una que baja. Las góndolas giran

a medida que la rueda da vueltas, de

modo que el agua y el bote no se vierten.

P RO P I EDA D ES D E L A M AT ER I A

P U N T O D E C O N T R O L

1. Un vaso de precipitados lleno con agua a más de la mitad de su capacidad pesa 20 N. ¿Cuál será la lectura de la báscula cuando

SCREENCAST: Problemas

de flotabilidad

a. un bloque de madera de 5 N flota en él?

b. un bloque de madera de 8 N flota en él?

Sólo en el caso especial de la flo-

2. El mismo vaso de precipitados, cuando se llena de agua, pesa 30 N.

tación, la fuerza de flotación que

¿Cuál será la lectura de la báscula, después de desbordarse, cuando *actúa sobre un objeto es igual al*

peso del objeto.

a. un bloque de madera de 5 N flota en él?

b. un bloque de madera de 8 N flota en él?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Las lecturas de la báscula aumentarán a medida que se agregue peso: a. 20 N 1 5 N 5 25 N, b. 20 N 1 8 N 5 28 N.*

2. *Para el vaso de precipitados que se desborda, el desplazamiento de agua por los bloques flotantes hace que el agua se desborde. a. El bloque de 5 N produce un desbordamiento de 5 N de agua, y b. el bloque de 8 N derrama 8 N de agua. De modo que la lectura de la báscula no cambia; permanece en 30 N.*

MONTAÑAS FLOTANTES

La punta de un iceberg que flota sobre la superficie del océano Cordillera es aproximadamente 10% de todo el iceberg. Esto se debe a

que el hielo tiene 0.9 veces la densidad del agua, de modo que

90% del mismo se sumerge en agua. De igual modo, una montaña

Corteza continental

F I G U R A 1 3 . 2 0

flota sobre el manto semilíquido de la Tierra sólo mostrando su

Corteza

La corteza continental

punta. Esto se debe a que la corteza continental de la Tierra tiene

es más profunda debajo

aproximadamente 0.85 veces la densidad del manto sobre el que

oceánica

de las montañas. (No a

flota; por ende, alrededor de 85% de una montaña se extiende por

Manto

escala.)

abajo de la superficie de la Tierra. Así que, al igual que los icebergs flotantes, las montañas tienen mucho más profundidad que altura.

manto más denso. Este aumento de la "brecha" reduce aún más la

Existe un interesante aspecto gravitacional secundario a esto:

gravitación en la parte superior de una montaña.

recuerda, del Capítulo 9, que el campo gravitacional en la superficie Otro hecho interesante acerca de las montañas: si pudieras recortar

de la Tierra varía un poco con las variadas densidades de la roca

la cima de un iceberg, éste sería más ligero y se levantaría por flotación subyacente (lo que constituye una valiosa información para los

casi hasta su altura original antes de ser recortado. De igual modo,

geólogos y los buscadores de petróleo), y que la gravitación es menor cuando las montañas se erosionan, son más ligeras y son empujadas en la cima de una montaña debido a la mayor distancia del centro de desde abajo para flotar casi hasta su altura original. De modo que, la Tierra. Al combinar estas ideas se observa que, dado que el fondo cuando se erosiona un kilómetro de montaña, un 85% de kilómetro de una montaña se extiende profundo en el manto de la Tierra, de montaña es empujado hacia arriba desde abajo. Es por eso que las hay un aumento de distancia entre la cima de una montaña y el montañas tardan tanto tiempo en desgastarse.

C A PÍ T U LO 13 L Í Q U I DOS

255

P U N T O D E C O N T R O L

Una barcaza cargada con grava se aproxima a un puente bajo por el

que no puede pasar. ¿Debes retirar grava o agregarla a la barcaza?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

¡Jo, jo jo! ¿Crees que el viejo Hewitt te dará todas las respuestas a las preguntas del Punto de control? Enseñar bien consiste en plantear buenas preguntas, no en dar todas las respuestas. ¡Esta vez estás solo!

***13.7** Principio de Pascal*

Uno de los hechos más importantes sobre la presión de los fluidos es que un cambio de presión en una parte del fluido se transmitirá sin disminución hacia todas las demás partes del fluido. Por ejemplo, si la presión del agua de la ciudad aumenta en la estación de bombeo en 10 unidades de presión, entonces la presión en todas partes dentro de las tuberías del sistema de conexión aumentará en 10 unidades de presión (siempre que el agua esté en reposo). Esta regla, descubierta en el siglo XVII por Blaise Pascal, se llama ***principio de Pascal****:*

Un cambio de presión en cualquier punto de un fluido encerrado en reposo se transmite sin disminución a todos los puntos del fluido.

Llena un tubo en U con agua y coloca pistones en cada extremo, como se muestra en la Figura 13.21. La presión ejercida contra el pistón izquierdo se transmitirá por ***F I G U R A 1 3 . 2 1***

todo el líquido y contra el fondo del pistón derecho. (Los pistones son simplemente La fuerza ejercida sobre el pistón izquierdo aumenta la presión en el líquido y se

“tapones” que pueden deslizarse libre pero ajustadamente en el interior del tubo.) La transmite hacia el pistón derecho.

presión que el pistón izquierdo ejerce contra el agua será exactamente igual a la presión que el agua ejerce contra el pistón derecho. Esto no es nada espectacular. Pero supón que haces que el tubo del lado derecho sea más ancho y usas un pistón de mayor área: entonces el resultado será impresionante. En la Figura 13.22 el pistón de la Área A Área 50A

F I G U R A 1 3 . 2 2

Una carga de 10 kg en el pistón

izquierdo soportará 500 kg en el pistón

derecho.

derecha tiene 50 veces el área del pistón de la izquierda (supón que el pistón izquierdo tiene un área transversal de 100 centímetros cuadrados y que el pistón derecho tiene un área transversal de 5,000 centímetros cuadrados). Supón que en el pistón izquierdo se coloca una carga de 10 kg. Entonces una presión adicional (casi 1 N/cm2) debida al peso de la carga se transmite a todo el líquido y sube contra el pistón más grande. Es aquí donde se demuestra la diferencia entre fuerza y presión. La presión adicional se ejerce contra cada centímetro cuadrado del pistón más grande. Dado que hay 50 veces el área, se ejerce 50 veces más fuerza sobre el pistón más grande. Por tanto, el pistón más grande soportará una carga de 500 kg, ¡50 veces la carga sobre el pistón más pequeño!

SCREENCAST: Principio de Pascal

Esto sí es algo espectacular, porque es posible multiplicar fuerzas con tal dispositivo.

Un newton de entrada produce 50 newtons de salida. Al aumentar aún más el área del pistón más grande (o reducir el área del pistón más pequeño), puedes multiplicar la fuerza, en principio, por cualquier cantidad. El principio de Pascal sirve de base para la operación de todos los dispositivos hidráulicos, de los cuales el más simple es la prensa hidráulica.

La prensa hidráulica no viola la conservación de la energía, porque una disminución en la distancia recorrida compensa el aumento en la fuerza. Cuando el pistón pequeño de la Figura 13.22 se mueve hacia abajo 10 centímetros, el pistón grande se elevará sólo 1/50 de esto, o 0.2 centímetros. La fuerza de entrada multiplicada por la distancia recorrida por el pistón más pequeño es igual a la fuerza de salida multiplicada por la distancia recorrida por el pistón más grande; éste es un ejemplo más de una máquina simple que funciona con el mismo principio que la palanca mecánica.

F I G U R A 1 3 . 2 3

El principio de Pascal en una estación

de servicio.

Compresor de aire

Pistón

Depósito

El principio de Pascal se aplica a todos los fluidos, ya sean gases o líquidos. Una aplicación común del principio de Pascal para gases y líquidos es el elevador de automóviles que se ve en muchos talleres de reparación (Figura 13.23). El aumento en la presión del aire producido por un compresor de aire se transmite a través del aire hacia la superficie de aceite en un depósito subterráneo. El aceite, a su vez, transmite la presión a un pistón, que eleva al automóvil. La presión relativamente baja que ejerce la fuerza de elevación contra el pistón es aproximadamente la misma que la presión del aire de los neumáticos del automóvil.

La hidráulica se emplea en los dispositivos modernos, desde los muy pequeños hasta los enormes. Observa los pistones hidráulicos de casi todas las máquinas de construcción donde se involucran cargas pesadas. Las muchas aplicaciones del principio de Pascal verdaderamente cambiaron el panorama del mundo.

P U N T O D E C O N T R O L

F I G U R A 1 3 . 2 4

1. A medida que se eleva el automóvil de la Figura 13.23, ¿cómo se compara el *El principio de Pascal actúa en los dis-cambio del nivel de aceite en el depósito con la distancia que se mueve el positivos hidráulicos de estas máquinas*

automóvil?

increíbles. Uno se pregunta si Pascal

imaginó la medida en la que su principio

2. Si un amigo comentó que un dispositivo hidráulico es una forma común *permitiría levantar cargas inmensas con*

de multiplicar energía, ¿tú qué dirías?

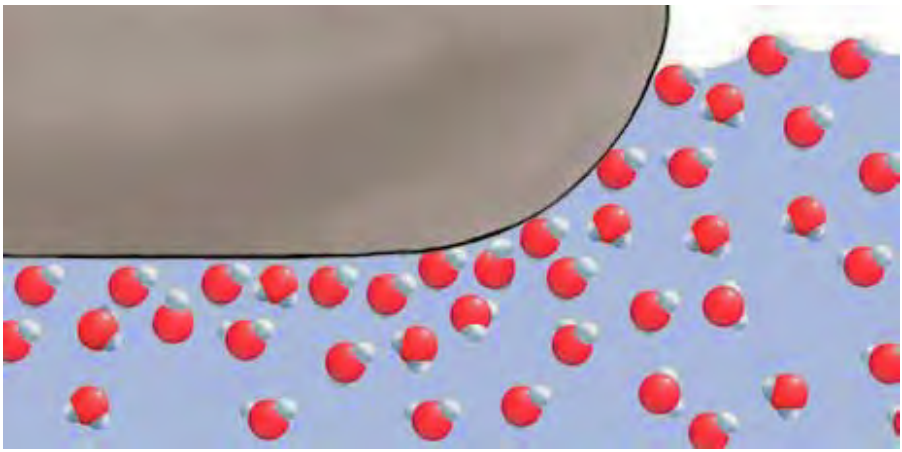
tanta facilidad.

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *El automóvil sube una mayor distancia que lo que baja el nivel de aceite, pues el área del pistón es más pequeña que el área superficial del aceite en el depósito.*

2. *¡No, no, no! Aunque un dispositivo hidráulico, como una palanca mecánica, puede multiplicar una fuerza, siempre lo hace a costa de la distancia. La energía es el producto de la fuerza y la distancia. Si aumentas una, disminuyes la otra.*

¡Jamás se ha encontrado ningún dispositivo que pueda multiplicar energía!



***13.8** Tensión superficial*

Imagina que suspendes un trozo doblado de alambre limpio de un resorte espiral sensible (Figura 13.25), bajas el alambre al agua y luego lo subes. Mientras tratas de liberar el alambre de la superficie del agua, ves en el resorte estirado que la superficie del agua ejerce una fuerza considerable sobre el alambre. La superficie del agua se resiste a ser estirada, pues tiene una tendencia a contraerse. Esto es evidente cuando se humedece un pincel de pelo fino. Cuando el pincel está bajo el agua, las cerdas están prácticamente tan suaves como lo están cuando el pincel está seco, pero cuando sacas el pincel Alambre

del agua, la película superficial de agua contrae y junta las cerdas (Figura 13.26). Esta doblado

*tendencia a la contracción de la superficie de los líquidos se llama **tensión superficial**.*

*La tensión superficial explica la forma esférica de las gotas de líquidos. Las gotas de l uvia, de aceite y las que caen de los metales fundidos son esféricas porque sus superficies tienden a contraerse y obligan a cada gota a adoptar la forma que tenga menor área superficial. Ésta es una esfera, la figura geométrica que tiene la menor área superficial para un volumen dado. Por esta razón, las gotas de niebla y de rocío sobre las telarañas o sobre las **F I G U R A 1 3 . 2 5***

vel osas hojas de las plantas son casi esféricas. (Cuanto más grandes sean, más las aplanará Cuando el alambre doblado se baja hacia la gravedad.)

el agua y luego se eleva, el resorte se esti-

rará debido a la tensión superficial.

F I G U R A 1 3 . 2 6

Cuando el pincel se saca del agua, las

F I G U R A 1 3 . 2 7

cerdas se mantienen unidas por la tensión

Las pequeñas gotas de agua adquieren formas

superficial.

esféricas debido a la tensión superficial.

La tensión superficial es causada por atracciones moleculares. Bajo la superficie, cada molécula es atraída en todas direcciones por las moléculas vecinas, lo que da por resultado que no haya ninguna tendencia a ser jaladas en una dirección específica.

Sin embargo, una molécula sobre la superficie de un líquido es jalada sólo por las moléculas vecinas a cada lado y hacia abajo desde abajo; no hay un jalón hacia arriba (Figura 13.28). Por ende, estas atracciones moleculares tienden a jalar la molécula desde la superficie hacia el líquido, y esta tendencia reduce al mínimo el área superficial. La superficie se comporta como si estuviera tensa en una película elástica. Esto ***F I G U R A 1 3 . 2 8***

es evidente cuando una aguja de acero o un clip de papel secos parecen flotar sobre Una molécula en la superficie es jalada sólo hacia los lados y hacia abajo por las

moléculas vecinas. Una molécula bajo la

superficie es jalada igualmente en todas

La superficie del agua

direcciones.

se dobla para alojar el

peso del clip de papel

Clip de papel

F I G U R A 1 3 . 2 9

Un clip de papel reposa sobre el agua, y

empuja la superficie hacia abajo ligera-

mente sin hundirse.

el agua en reposo. La Figura 13.29 muestra un clip de papel que no

flota en el agua, sino que reposa sobre el agua. La ligera depresión en la superficie del agua es causada por el peso del clip, que empuja hacia abajo sobre el agua. La tendencia elástica que se encuentra en

la superficie es la tensión superficial, suficiente para sostener el peso del clip. La tensión superficial permite a ciertos insectos, como los zancudos de agua de la familia de los Gerridae, correr por la superficie de un estanque.

La tensión superficial del agua es mayor que la de otros líquidos

comunes, y el agua pura tiene una tensión superficial más fuerte que el

agua jabonosa. Puedes ver esto cuando una pequeña película de jabón

sobre la superficie del agua es efectivamente estirada sobre toda la su-F I G U R A 1 3 . 3 0

perficie. Esto reduce al mínimo el área superficial del agua. Lo mismo ocurre con el acei-El maestro de las burbujas, Tom Noddy, te o la grasa que flotan sobre el agua. El aceite tiene menos tensión superficial que el agua sopla burbujas dentro de burbujas.

fría, y se estira en una película que cubre toda la superficie. Esta dispersión es evidente en La burbuja grande se estira debido al

los derrames de petróleo. Sin embargo, el agua caliente tiene menos tensión superficial soplido, pero rápidamente se asentará en

una forma esférica debido a la tensión

que el agua fría, porque las moléculas que se mueven más rápido no están enlazadas tan superficial.

firmemente. Esto permite que la grasa o el aceite de las sopas calientes flote en pequeñas burbujas sobre la superficie de la sopa. Cuando la sopa se enfría y la tensión superficial del agua aumenta, la grasa o el aceite se extiende sobre la superficie de la sopa. La sopa se vuelve "grasosa". La sopa caliente sabe diferente a la sopa fría principalmente porque la tensión superficial del agua en la sopa cambia con la temperatura.

***13.9** Capilaridad*

Cuando el extremo de un tubo de vidrio completamente limpio, con un diámetro interior pequeño, se sumerge en el agua, el agua moja el interior del tubo y se eleva en él.

En un tubo con una perforación de aproximadamente ½ milímetro de diámetro, por ejemplo, el agua se eleva ligeramente más arriba de 5 centímetros. Con una perforación todavía menor, el agua se eleva mucho más alto (Figura 13.31). Este ascenso de un líquido por un tubo hueco delgado o en un espacio estrecho se llama ***capilaridad****.*

Cuando pienses en capilaridad, piensa que las moléculas son como bolas pegajosas.

Las moléculas de agua se pegan al vidrio más que entre ellas mismas. La atracción entre sustancias distintas como agua y vidrio se llama adhesión. La atracción entre sustancias ***F I G U R A 1 3 . 3 1***

parecidas, pegajosidad molecular, se llama cohesión. Cuando un tubo de vidrio se sumer-Tubos capilares.

ge en agua, la adhesión entre el vidrio y el agua hace que una delgada película de agua se estire sobre las superficies interior y exterior del tubo (Figura 13.32a). La tensión superficial hace que esta película se contraiga (Figura 13.32b). La película en la superficie exterior se contrae lo suficiente para formar un borde redondeado. La película en la superficie interior se contrae más y eleva el agua consigo hasta que la fuerza adhesiva se equilibra por el peso del agua elevada (Figura 13.32c). En un tubo más estrecho, el peso del agua en el tubo es menor y el agua se eleva más de lo que lo haría si el tubo fuera más ancho.

Si un pincel se sumerge parcialmente en agua, el agua se elevará por los espacios estrechos entre las cerdas por la acción capilar. Si tu cabello es largo, deja que cuelgue en el fregadero o en la tina, y el agua subirá al cuero cabelludo de la misma forma. Así es como el aceite empapa la mecha de una lámpara y el agua empapa una toalla cuando un extremo cuelga en el agua. Sumerge un extremo de un terrón de azúcar en café y todo el terrón se humedecerá rápidamente. La acción capilar es esencial para el creci-

(a)

(b)

(c)

miento de las plantas. En los árboles lleva agua a las ramas y hojas altas desde las raíces de la planta y transporta savia y nutrientes de las hojas a las raíces. Casi en cualquier parte que mires, podrás ver la capilaridad en acción. Eso es bueno.

Pero, para un insecto la capilaridad no es tan buena. Recuerda del Capítulo 12 que, debido al área superficial relativamente grande de un insecto, éste cae lentamente en ***F I G U R A 1 3 . 3 2***

el aire. La gravedad casi no plantea riesgo, mas no así la capilaridad. Estar al borde del Etapas hipotéticas de acción capilar, en

agua puede ser mortal para un insecto, a menos que esté equipado para el agua como vistas transversales de un tubo capilar.

el zancudo de agua (Gerridae).

C A PÍ T U LO 13 R E V ISI Ó N

RESUMEN DE TÉRMINOS *(CONOCIMIENTO)*
Presión. *La razón de la fuerza con respecto al área sobre la cual*
Principio de flotación. *Un objeto flotante desplaza un peso de se distribuye dicha fuerza:*

fluido igual a su propio peso.

Principio de Pascal. *La presión aplicada a un fluido sin*

Presión = fuerza

área

movimiento confinado en un recipiente se transmite sin

disminución a través del fluido.

Presión del líquido densidad de peso profundidad

Tensión superficial. *Tendencia de la superficie de un líquido* ***Fuerza de flotación.*** *Fuerza neta ascendente que un fluido*

a contraerse en área y, por ende, a comportarse como una

ejerce sobre un objeto sumergido.

membrana elástica estirada.

Principio de Arquímedes. *Un cuerpo sumergido es sostenido*

Capilaridad. *El ascenso de un líquido por un tubo hueco fino por una fuerza igual al peso del fluido que desplaza.*

o por un espacio estrecho.

PREGUNTAS CONCEPTUALES *(COMPRENSIÓN)*
13.1 Presión

15. ¿Cuál es la condición en la que la fuerza de flotación

1. ¿Cómo se relaciona la presión con la fuerza?

sobre un objeto sí es igual al peso del objeto?

16. ¿La fuerza de flotación sobre un objeto sumergido

13.2 Presión de un líquido

depende del volumen del objeto o del peso del objeto?

2. ¿Cómo se relaciona la presión en el fondo de un cuerpo de

17. Llena los espacios: Un objeto más denso que el agua

agua con el peso del agua sobre cada metro cuadrado de la

en el agua. Un objeto menos denso que el agua

superficie inferior?

en el agua. Un objeto que tenga la misma densidad

3. ¿Cuál es la relación entre la presión del líquido y la

que el agua

en el agua.

profundidad de un líquido? ¿Entre la presión del líquido

18. ¿Cómo se controla la densidad de un pez? ¿Cómo se

y la densidad de peso?

controla la densidad de un submarino?

4. Si nadas bajo la superficie en agua salada, ¿la presión será

mayor que en agua dulce a la misma profundidad?

13.6 Flotación

5. ¿Cómo se compara la presión del agua 1 m bajo la

19. Anteriormente se puso énfasis en que la fuerza de

superficie de un pequeño estanque, con la presión del

flotación no es igual al peso de un objeto, sino que es

agua 1 m bajo la superficie de un enorme lago?

igual al peso del agua desplazada. Ahora se dice que la

6. Si perforas un orificio en un recipiente lleno con agua, ¿en

fuerza de flotación es igual al peso del objeto. ¿No es esto

qué dirección fluirá inicialmente el agua fuera del recipiente?

una gran contradicción? Explica.

20. ¿Por qué las góndolas de la Falkirk Wheel (Figura 13.19)

13.3 Flotabilidad

tienen el mismo peso ya sea que transporten o no

7. ¿Por qué la fuerza de flotación actúa hacia arriba sobre un

transporten botes?

objeto sumergido en agua?

13.7 Principio de Pascal

8. ¿Por qué no hay fuerza de flotación horizontal sobre un

objeto sumergido?

21. ¿Qué ocurre con la presión en todas partes de un fluido

9. ¿Cómo se compara el volumen de un objeto completamente

confinado si la presión en una parte aumenta?

sumergido con el volumen del agua desplazada?

22. Si la presión en una prensa hidráulica aumenta

en 10 N/cm2 adicionales, ¿cuánta carga adicional

13.4 Principio de Arquímedes

soportará el pistón de salida si su área transversal es

10. ¿Cómo se compara la fuerza de flotación sobre un objeto

50 cm2?

sumergido con el peso del agua desplazada?

13.8 Tensión superficial

11. Distingue entre un cuerpo en inmersión y un cuerpo

sumergido.

23. ¿Qué forma geométrica tiene el área superficial más

pequeña para un volumen dado?

12. ¿Cuál es la masa de 1 L de agua? ¿Su peso en newtons?

24. ¿Cuál es la causa de la tensión superficial?

13. Si un recipiente de 1 L se sumerge a la mitad en agua,

¿cuál es el volumen del agua desplazada? ¿Cuál es la

13.9 Capilaridad

fuerza de flotación sobre el recipiente?

25. Distingue entre fuerzas adhesivas y cohesivas.

13.5 ¿Qué hace que un objeto se hunda o flote?

26. ¿Cómo se relaciona la altura a la que sube el agua en

14. ¿La fuerza de flotación sobre un objeto sumergido

un tubo capilar, con la adhesión y con el peso del agua

es igual al peso del objeto o igual al peso del fluido

levantada?

desplazado por el objeto?

E L A M

A M AT

AT ER

ER I A

P I E N S A Y R E A L I Z A *(A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 27. Coloca un huevo en una cacerola con agua del grifo.*

seguridad, aleja la cabeza de arriba de la lata cuando ésta

Luego disuelve sal en el agua hasta que el huevo flote.

impacte.)

¿Cómo se compara la densidad de un huevo con la del

30. El jabón debilita enormemente las fuerzas cohesivas entre

agua del grifo? ¿Con la del agua salada?

las moléculas de agua. Puedes ver esto si agregas algo

28. Si perforas un par de orificios

de aceite a una botel a de agua y la agitas de modo que el

en el fondo de un recipiente

aceite y el agua se mezclen. Observa que el aceite y el agua

lleno de agua, el agua saldrá

se separan rápidamente en cuanto dejas de agitar la botel a.

debido a la presión del agua.

Ahora agrega algo de jabón líquido a la mezcla. Agita la

Ahora suelta el recipiente y,

botel a de nuevo y verás que el jabón forma una delgada

mientras está en caída libre,

película alrededor de cada pequeña cuenta de aceite y que se

¡observa que ya no sale agua! Si tus amigos no entienden

necesita más tiempo para que el aceite se combine después

esto, ¿podrías resolverlo y explicárselos?

de dejar de agitar la botel a. Así es como funciona el jabón

29. Pon a flotar una pelota de ping-pong mojada en agua

en la limpieza. Rompe la tensión superficial alrededor de

en una lata con agua que esté sostenida a más de un

cada partícula de mugre de modo que el agua pueda llagar

metro por encima de un suelo rígido. Luego suelta la

a las partículas y rodearlas. El enjuague se lleva la mugre. El

lata. Una inspección cuidadosa te mostrará que la bola

jabón es un buen limpiador sólo en presencia de agua.

fue llevada bajo la superficie mientras la pelota y la lata

31. Espolvorea pimienta negra sobre la superficie de un poco

caían. (¿Qué te dice esto acerca de la tensión superficial?)

de agua pura en un platillo. La pimienta flota. Agrega

Más asombroso, cuando la lata impacte con el suelo,

una gota de jabón líquido a la superficie y los granos de

¿qué sucede con la pelota y por qué? ¡Inténtalo y te

pimienta se repelen de la gota de jabón. Agita suavemente

sorprenderás! (Precaución: A menos que lleves gafas de

una o dos veces y observa cómo se hunde la pimienta.

S U S T I T U Y E Y L I S T O *(F A M I L I A R I Z A C I Ó N C O N E C U A C I O N E S)* ***fuerza***

34. Demuestra que la presión del agua en el fondo de la torre

Presión = área

de agua de 50 m de alto, que se muestra en la fotografía de

32. Calcula la presión que ejerce un bloque de 10 N sobre la

apertura del capítulo, es 500,000 N/m2, que es aproxima-

mesa donde descansa, si su área de contacto es 50 cm2.

damente 500 kPa.

Presión 5 densidad de peso 3 profundidad

35. La profundidad del agua detrás de la presa Hoover es

(Usa 10,000 N/m3 para la densidad de peso del agua e ignora la

220 m. Demuestra que la presión del agua en la base de

presión debida a la atmósfera en los siguientes cálculos.)

esta presa es 2,200 kPa.

36. El piso superior de un edificio está 20 m arriba del

33. Un barril de 1 m de alto está lleno de agua (con una

sótano. Demuestra que la presión del agua en el sótano

densidad de peso de 10,000 N/m3). Demuestra que la

es casi 200 kPa mayor que la presión del agua en el piso

presión del agua sobre el fondo del barril es 10,000 N/m2

superior.

o, de manera equivalente, 10 kPa.

P I E N S A Y R E S U E L V E *(A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 37. Calcula la fuerza promedio por clavo cuando Sarah,*

bajo la superficie del agua. ¿Cuánta fuerza debe aplicar

quien pesa 120 libras, se acuesta en una cama de clavos y

un niño al orificio con su pulgar para detener la fuga?

es sostenida por 600 clavos (consulta la Figura 13.2).

¿Podría hacerlo?

38. Imagina que equilibras una bola de 5 kg en la punta

42. En el laboratorio descubres que una roca de 1 kg suspendida

de tu dedo, que tiene un área de 1 cm2. Demuestra que

encima del agua pesa 10 N. Cuando la roca se suspende de-

la presión sobre tu dedo es de 50 N/cm2, que es 500 kPa.

bajo de la superficie del agua, la lectura de la báscula es 8 N.

39. Un trozo de metal de 12 kg desplaza 2 L de agua cuando se

sumerge. Demuestra que su densidad es 6,000 kg/m3.

¿Cómo se compara esto con la densidad del agua?

10 N

40. Un barril de 1 m de alto está cerrado en la parte superior

8 N

excepto por un pequeño tubo que se extiende 5 m por

arriba de la parte superior. Cuando el barril está lleno

con agua hasta la base del tubo (1 m de profundidad),

la presión del agua sobre la parte inferior del barril es

10 N

10 kPa. ¿Cuál es la presión sobre la parte inferior cuando

?

?

se agrega agua para llenar el tubo hasta su parte superior?

(a)

(b)

(c)

41. Una presa en Holanda empieza a hacer agua a través de un orificio de 1 cm2 de área a una profundidad de 2 m

a. ¿Cuál es la fuerza de flotación sobre la roca?

2

b. Si el recipiente de agua pesa 10 N sobre la báscula,

para el oro puro, el volumen de agua

¿cuál es la lectura de la báscula cuando la roca se

desplazada será 51.8 cm3.

suspende debajo de la superficie del agua?

44. En los pistones hidráulicos que se mues-

c. ¿Cuál es la lectura de la báscula cuando la roca se

tran en el dibujo, el pistón pequeño

libera y descansa en el fondo del recipiente?

tiene un diámetro de 2 cm. El pistón

43. Un mercader en Katmandú te vende una estatua de oro

grande tiene un diámetro de 6 cm.

sólido de 1 kg a un precio muy razonable. Cuando llegas

¿Cuánta más fuerza puede ejercer el

a casa, te preguntas si conseguiste o no una ganga, de

pistón más grande, comparada con la

modo que sumerges la estatua en un recipiente de agua

fuerza aplicada al pistón más pequeño?

y mides el volumen de agua desplazada. Demuestra que,

45. Tu amigo, de 100 kg de masa, apenas puede flotar en

agua dulce. Calcula su volumen aproximado.

***P I E N S A Y C L A S I F I C A** (A N Á L I S I S)*

46. Clasifica las presiones, de mayor a menor, para lo

48. Piensa en lo que ocurre con el

siguiente:

volumen de un globo lleno de aire

a. Fondo de un recipiente de 20 cm de alto con agua salada

arriba del agua y debajo del agua.

b. Fondo de un recipiente de 20 cm de alto con agua dulce

Luego clasifica las fuerzas de flotación

c. Fondo de un recipiente de 5 cm de alto con mercurio

sobre un globo con pesas en agua, de

mayor a menor, cuando

47. Clasifica lo siguiente, de mayor a menor, por el

porcentaje de su volumen arriba de la línea de agua:

a. apenas flota con su parte superior

en la superficie.

a. Balón de básquetbol que flota en agua dulce

b. se empuja 1 m bajo la superficie.

b. Balón de básquetbol que flota en agua salada

c. se empuja 2 m bajo la superficie.

c. Balón de básquetbol que flota en mercurio

***P I E N S A Y E X P L I C A** (S Í N T E S I S)*

49. ¿Qué líquido común cubre más de dos tercios del planeta,

59. El dibujo muestra un depósito de

constituye 60% de tu cuerpo y sostiene la vida y los

madera reforzado con aros metálicos

estilos de vida en incontables formas?

que suministra agua a una granja.

50. Sabes que un cuchillo filoso corta mejor que un cuchillo

a. ¿Por qué está elevado? b. ¿Por qué los

romo. ¿Sabes por qué? Defiende tu respuesta.

aros están más juntos cerca de la parte

51. ¿Qué es más probable que te lastime: ser pisado por un

inferior del tanque?

hombre de 200 lb que usa mocasines, o ser pisado por una

60. Un bloque de aluminio con un volumen

mujer de 100 lb que usa tacones de aguja?

de 10 cm3 se coloca en un vaso de

52. ¿Cuál supones que ejerce más presión sobre el suelo: un elefan-

precipitados con agua hasta el borde.

te de 5,000 kg o una mujer de 50 kg de pie sobre tacones de

El agua se desborda. Lo mismo se hace en otro vaso de

aguja? (¿Cuál es más probable que haga muescas en un piso de

precipitados con un bloque de plomo de 10 cm3. ¿El plomo

linóleo?) Realiza un cálculo aproximado para cada uno.

desplaza más, menos o la misma cantidad de agua?

53. ¿Por qué las personas que están confinadas a la cama tienen

61. Un bloque de aluminio con una masa de 1 kg se coloca

menos probabilidad de desarrol ar llagas en el cuerpo si

en un vaso de precipitados con agua hasta el borde. El

descansan sobre una cama de agua que sobre un colchón

agua se desborda. Lo mismo se hace en otro vaso de

ordinario?

precipitados con un bloque de plomo de 1 kg. ¿El plomo

54. ¿Por qué la presión sanguínea se mide en el brazo, a la

desplaza más, menos o la misma cantidad de agua?

altura del corazón?

62. Un bloque de aluminio con un peso de 10 N se coloca en

55. ¿Por qué tu cuerpo consigue más descanso cuando te

un vaso de precipitados con agua hasta el borde. El agua se

acuestas que cuando te sientas? ¿La presión sanguínea en

desborda. Lo mismo se hace con otro vaso de precipitados

tus piernas es mayor?

con un bloque de plomo de 10 N. ¿El plomo desplaza más,

menos o la misma cantidad de agua? (¿Por qué tus respuestas

56. Cuando estás de pie, la presión sanguínea en tus piernas

difieren de las respuestas a las dos preguntas anteriores?)

es mayor que en la parte superior de tu cuerpo. ¿Esto sería

cierto para un astronauta en órbita? Defiende tu respuesta.

63. En 1960, el batiscafo Trieste (un sumergible) de la marina estadounidense descendió hasta una profundad de casi

57. Si los grifos del piso superior y el piso inferior se abren

11 km en la Fosa de las Marianas, cerca de Filipinas,

completamente, ¿fluirá más agua por segundo de los

en el Océano Pacífico. En lugar de una gran ventana de

grifos del piso superior o de los del piso inferior?

visualización, tenía una pequeña ventana circular de

58. ¿Cómo se compara la presión del agua 1 m bajo la superficie

15 cm de diámetro. ¿Cuál es tu explicación para tan

de un lago, con la presión del agua 1 m bajo la superficie de

pequeña ventana?

una alberca?

PA R T E D OS

P RO

RO P I EDA

DA D ES D E L

E L A M

A M AT

AT ER

ER I A

64. Si te has preguntado acerca de la descarga de los retretes en

rodea el cerebro es de más o menos 14.5 N. ¿Esto significa

los pisos superiores de los rascacielos, ¿cómo supones que

que el peso del líquido que rodea al cerebro es de al menos

está diseñada la plomería de modo que no haya un enorme

14.5 N? Defiende tu respuesta.

impacto de desechos que llegan al nivel del sótano? (Verifica

83. Un barco que navega desde el océano hacia un puerto

tus especulaciones con alguien que tenga conocimientos de

en agua dulce se hunde ligeramente más profundo en el

arquitectura.)

agua. ¿La fuerza de flotación sobre el barco cambia? Si es

65. ¿Por qué el agua "busca su nivel"?

así, ¿aumenta o disminuye?

66. Cuando te bañas en una playa rocosa, ¿por qué las piedras

84. Las densidades relativas del agua, el hielo y el alcohol son

del fondo lastiman menos tus pies cuando te paras en agua

1.0, 0.9 y 0.8, respectivamente. ¿Los cubos de hielo flotan

profunda?

más alto o más bajo en una bebida alcohólica mezclada?

67. Si la presión de un líquido fuera la misma en todas las

Comenta acerca de los cubos de hielo sumergidos en el

profundidades, ¿habría una fuerza de flotación sobre un

fondo de un cóctel.

objeto sumergido en el líquido? Explica.

85. Cuando un cubo de hielo se funde en un vaso con

68. ¿Por qué es más fácil flotar en agua salada que en agua dulce?

agua, ¿el nivel del agua en el vaso se eleva, desciende

69. Para responder a la pregunta de por qué los cuerpos flotan

o permanece igual? ¿Tu respuesta cambia si el cubo de

más en agua salada que en agua dulce, tu amigo responde

hielo tiene muchas burbujas de aire? ¿Y si el cubo de hielo

que la razón es que el agua salada es más densa que el agua

contiene muchos granos de arena pesada?

dulce. (¿Tu amigo con frecuencia sólo recita enunciados fác-

86. Cuando un bloque de madera se coloca en

ticos que se relacionan con las respuestas y no ofrece razones

el vaso de precipitados, ¿qué sucede con la

concretas?) ¿Cómo responderías a la misma pregunta?

lectura de la báscula? Responde la misma

70. Una lata de gaseosa dietética flota en el agua, en tanto

pregunta para un bloque de hierro.

que una lata de gaseosa regular se hunde. Explica este

87. Una góndola en la Falkirk Wheel

fenómeno, primero en términos de densidad, luego en

transporta un bote de 50 ton, mientras

términos de peso frente a la fuerza de flotación.

que la otra transporta un bote de 100 ton. ¿Por qué las

71. ¿Por qué un bloque de hierro flotará en mercurio pero se

góndolas no obstante pesan lo mismo?

hundirá en agua?

88. Considera tanto un bote de 50 ton como un bote de

72. Las montañas de los Himalayas son un poco menos

100 ton que flotan lado a lado en la góndola de la Falkirk

densas que el material del manto sobre el cual "flotan".

Wheel, mientras la góndola opuesta no transporta botes.

¿Supones que, al igual que los icebergs flotantes, son más

¿Por qué las góndolas no obstante pesan lo mismo?

profundos que altos?

89. Una pequeña pecera llena a la mitad con agua está

73. ¿Por qué una alta montaña compuesta principalmente de

sobre un dinamómetro. ¿La lectura del dinamómetro

plomo es una imposibilidad en la Tierra?

aumentará o permanecerá igual si un pez se coloca

74. ¿Cuánta fuerza se necesita para mantener bajo la superficie

en la pecera? (¿Tu respuesta será diferente si la pecera

del agua un cartón rígido de 1 L casi sin peso?

inicialmente está llena hasta el borde?)

75. ¿Por qué un balón de voleibol sostenido bajo la superficie

90. ¿Qué experimentarías al nadar en agua en un hábitat

del agua soporta más fuerza de flotación que si estuviera

espacial en órbita donde la gravedad simulada es g?

flotando?

¿Flotarías en el agua como lo haces en la Tierra?

76. ¿Por qué una pelota de playa inflada, empujada bajo

91. Se dice que la forma de un líquido es la misma que la

la superficie del agua, se dispara con rapidez sobre la

forma de su recipiente. Pero, sin recipiente ni gravedad,

superficie del agua cuando se le libera?

¿cuál es la forma natural de una gota de agua? ¿Por qué?

77. ¿Por qué es inexacto decir que los objetos pesados se

92. Si sueltas una pelota de ping-pong bajo la superficie del

hunden y que los objetos ligeros flotan? Ofrece ejemplos

agua, ésta se elevará a la superficie. ¿Haría lo mismo si

exagerados que sustenten tu respuesta.

estuviera adentro de una gran gota de agua que flota

78. ¿Por qué la fuerza de flotación sobre un submarino

ingrávida en una nave espacial en órbita?

sumergido es mucho mayor que la fuerza de flotación

93. De modo que tienes una racha de mala suerte y te

sobre él mientras flota?

introduces tranquilamente en un pequeño estanque en

79. ¿Una roca ganará o perderá fuerza de flotación mientras

calma donde cocodrilos hambrientos escondidos en el

se hunde más profundo en el agua? ¿O la fuerza de

fondo se apoyan en el principio de Pascal para ayudarse

flotación permanecerá igual a mayores profundidades?

a detectar una indefensa presa. ¿Qué tiene que ver el

Defiende tu respuesta.

principio de Pascal con su deleite a tu llegada?

80. ¿Una nadadora ganará o perderá fuerza de flotación mientras

94. En el arreglo hidráulico

nada más profundo en el agua? ¿O su fuerza de flotación

que se muestra, el pistón

permanecerá igual a mayores profundidades? Defiende tu

más grande tiene un

respuesta y compárala con tu respuesta a la pregunta anterior.

área que es 50 veces la

del pistón más pequeño.

81. La densidad de una roca no cambia cuando se sumerge

El hombre fuerte espera

en agua, pero tu densidad cambia cuando estás

ejercer suficiente fuerza

sumergido. Explica.

sobre el pistón grande

82. El peso del cerebro humano es de aproximadamente 15 N.

para elevar los 10 kg que

La fuerza de flotación proporcionada por el líquido que

descansan sobre el pistón pequeño. ¿Crees que tendrá

96. ¿Por qué el agua caliente fluirá con más facilidad que

éxito? Defiende tu respuesta.

el agua fría por las pequeñas fugas del radiador de un

95. En el arreglo hidráulico que se muestra en la

automóvil?

Figura 13.22, la multiplicación de fuerza es igual a la

97. Un pequeño clip de papel seco descansa sobre la superficie de agua en reposo. ¿Por qué un clip más pesado no puede hacer lo mismo sin hundirse?

98. Un trozo de acero se hundirá en el agua. Pero una navaja de afeitar de acero, colocada cuidadosamente sobre la superficie del agua, no se hundirá. ¿Cuál es tu explicación?

***PIENSA Y DISCUTE** (EVALUACIÓN)*

99. La fotografía muestra al maestro de física Marshall Ellenstein caminando descalzo sobre botellas de vidrio rotas en su salón de clase. Discute el concepto físico que demuestra cómo apenas puede flotar en agua. Si se empuja bajo la superficie razón de las áreas de los pistones grande y pequeño.

Algunas personas se sorprenden cuando ven que el área de la superficie del líquido en el depósito del arreglo que se muestra en la Figura 13.23 es irrelevante. ¿Cuál es tu explicación para resolver esta confusión?

108. ¿El nivel del agua en una esclusa subiría o bajaría si una nave de guerra se hunde en la esclusa? Otra buena discusión.

109. Un globo se carga con pesas de modo que apenas puede flotar en el aire. Discute el concepto físico que demuestra cómo apenas puede flotar en agua. Si se empuja bajo la superfi-

Marshall. ¿Por qué tiene cui-

cie, ¿regresará a la superficie, per-

dado de que las piezas rotas

manecerá en la profundidad a la que

sean pequeñas y numerosas?

se empuja o se hundirá? En tu dis-

(¡Las curitas en sus pies son

cusión, considera cualquier cambio

por sentido del humor!)

en la densidad del globo.

100. Discute cuál tetera contiene más líquido y por qué.

110. Supón que te dan a escoger entre dos chalecos salvavidas

que son idénticos en tamaño, el primero es uno ligero con

relleno de espuma de estireno y el segundo es uno muy

pesado con relleno de grava. Si sumerges estos chalecos

salvavidas en el agua, ¿sobre cuál será mayor la fuerza de

flotación? ¿Sobre cuál no será efectiva la fuerza de flo-

tación? Discute por qué tus respuestas son diferentes.

101. Hay una leyenda de un niño holandés que contuvo con

111. En un paseo en bote, el capitán te entrega un chaleco

valor todo el Mar del Norte al tapar con su dedo un agu-

salvavidas extra grande con relleno de bolitas de plomo.

jero en un dique. Discute si esto es o no posible y razona-

Cuando ve el escepticismo en tu rostro, dice que, si caes

ble. (Consulta también el Piensa y resuelve 41.)

por la borda, experimentarás mayor fuerza de flotación

102. Hay una historia acerca de un asistente de Pascal que

que tus amigos que usan chalecos salvavidas de tamaño

subió una escalera y vertió un pequeño recipiente de agua

normal rellenos de espuma de estireno. ¿Dice la verdad?

en un tubo vertical, alto y delgado, insertado en un barril

112. Greta Novak es invitada a la notable flotación en el

de madera lleno de agua al pie de la escalera. El barril

muy salado Mar Muerto. ¿Cómo se compara la fuerza

explotó cuando el agua del tubo llegó aproximadamente

de flotación sobre ella cuando flota en agua dulce? Para

a 12 m. Esto fue muy intrigante, porque el peso del agua

responder esta pregunta, discute las diferencias en el

agregada en el tubo era muy pequeño. Discute y explica.

volumen del agua desplazada en los dos casos.

103. Supón que quieres tender un cimiento plano para una

casa en un terreno montañoso y espeso de vegetación.

Discute cómo podrías usar una manguera llena de agua

para determinar iguales elevaciones en puntos distantes.

104. Un trozo de hierro colocado sobre un bloque de madera

hace que el bloque flote más bajo en el agua. Si en vez de

ello el hierro se suspendiera bajo la madera, ¿la madera

flotaría tan bajo, más bajo o más alto? Discute.

105. Comparado con un barco vacío, ¿un barco repleto con una carga de espuma de estireno se hundiría más profundo en el agua o se elevaría en el agua? Discute.

106. Si un submarino comienza a hundirse, ¿seguirá hundiéndose hasta el fondo si no se hacen cambios? Discute.

107. Una barcaza llena con chatarra de hierro está en una esclusa. Si el hierro se tira por la borda, ¿el nivel del agua al lado de la esclusa se eleva, desciende o permanece igual? ¡Esto es tema para una buena discusión!

113. ¿Ocurriría flotación en ausencia de peso? Discute la flotación que ocurriría o no ocurriría en la Estación Espacial Internacional.

114. Si el campo gravitacional de la Tierra aumentara, ¿un pez flotaría a la superficie, se hundiría o permanecería a la misma profundidad?

14 ***1***

C A P Í T U L O 1 4

Gases

2

3

14.1 La atmósfera

14.2 Presión atmosférica

14.3 Ley de Boyle

14.4 Flotabilidad del aire

14.5 El principio de Bernoulli

14.6 Plasma

4

5

1 *Las fuerzas debidas a la presión atmosférica se muestran muy bien por parte de los profesores suecos de física, padre e hijo, P. O. y Johan Zetterberg, quienes jalan de un modelo pedagógico de los hemisferios*

de Magdeburgo. ***2*** *Una imagen de la famosa demostración de Otto von Guericke, de 1654, de los hemisferios de Magdeburgo originales,*

los cuales, cuando se vaciaron de aire, no pudieron separarlos dos

equipos de cabal os. ***3*** *Con un carrete y un trozo de cartón, Evan Jones juega con Bernoul i. Cuando sopla por el orificio del carrete y reduce la presión del aire entre la tarjeta y el carrete, la presión atmosférica sobre la parte exterior de la tarjeta la empuja hacia adentro. (Si lo intentas, pincha con un alfiler a través del punto medio de la tarjeta para dar estabilidad.)* ***4*** *Ole Anton Haugland, de rodil as, anima a sus profesores de física noruegos en capacitación a que construyan*

globos aerostáticos con papel de seda.

C A PÍ T U LO 14 G A SES

265

La física está establecida firmemente en el sistema

educativo del sur de Suecia. Una aportación impor-

tante a el o ha sido el esfuerzo pedagógico de Per

Olof Zetterberg, de la Lund University. Per Olof, conocido

simplemente como P.O., sostiene que el primer curso uni-

versitario de un estudiante de física debe ser una experien-

cia agradable. Es correcto: agradable. Por ser agradable, su

clase ha inspirado a muchos estudiantes a especializarse en

física, quienes de otro modo quizá no lo hubiesen hecho.

P.O. presenta la física a los alumnos principiantes como

"primero fascinación; luego, rigor… cuando estén prepara-

dos". P.O. trabaja con su hijo Johan, también doctorado en

física, reciente adquisición del personal docente de la Lund

University. Este equipo padre e hijo, que juguetonamente

la presentación de demostraciones de física enriquecidas

jalan sobre los hemisferios de Magdeburgo, como se mues-

con actividades de luz láser a comunidades dentro y fuera

tra en la fotografía al inicio del capítulo, acompañados por

de Suecia. Su lema es "¡Tienen física, viajaremos!". Con

la prometida de Johan, la física Sara Blomberg, forman un

su dedicación a la enseñanza de la física, auxiliado por su

impresionante equipo Lund que fomenta el aprecio público

buena energía, el equipo Lund contribuye a que la física

por la física. El equipo promueve aún más este aprecio con

esté vivita y coleando en Escandinavia.

***14.1** La atmósfera*

El grosor de la atmósfera está determinado por dos factores contrarios: la energía ciné-Así es, 99% de la atmósfera de la

Tierra está por abajo de una alti-

tica de sus moléculas, que tiende a dispersar las moléculas, y la gravedad,

que tiende a tud de 30 km (sólo 0.5% del radio

mantenerlas cerca de la Tierra. Si de algún modo pudiera desconectarse la gravedad de de la Tierra).

la Tierra, las moléculas atmosféricas se disiparían y desaparecerían. O si la gravedad actuara pero las moléculas se movieran con mucha lentitud para

formar un gas (como puede ocurrir en un remoto planeta frío), la

"atmósfera" sería una capa líquida o sólida, pues mucha más mate-

–55 ˚C

Capa de ozono

40 km

ria reposaría en el suelo. No habría nada que respirar. La atmósfera

te mantiene vivo y caliente, y sin ella, perecerías en minutos.

Pero la atmósfera es un feliz término medio entre las moléculas

–55 ˚C

energéticas que tienden a huir y la gravedad que las retiene. Sin

99% de la atmósfera

30 km

energía solar, las moléculas de aire yacerían en la superficie de la

está abajo de aquí

Tierra de la forma en que las rosetas de maíz se asientan en el fon-

do de una máquina de rosetas. Pero, si se agrega calor a las rosetas

de maíz y a los gases atmosféricos, ambos retomarían su camino de

20 km

90% de la atmósfera

ascenso a mayores altitudes. Las rosetas de maíz en una máquina

está abajo de aquí

alcanzan rapideces de algunos kilómetros por hora y llegan a al-

turas de hasta un metro o dos; las moléculas en el aire se mueven

con rapideces de aproximadamente 1,600 kilómetros por hora y

10 km

–36 ˚C

Nubes cirrus Mt.

alcanzan muchos kilómetros de altura. Por fortuna, hay un Sol

Nubes

Everest

50% de la

energizante, hay gravedad y la Tierra tiene atmósfera.

cúmulos

Mt.

atmósfera

La altura exacta de la atmósfera no tiene un significado real

Whitney

Troposfera

–2 ˚C

está abajo

porque el aire se hace cada vez más y más delgado cuanto más alto

de 5.6 km

suba uno. Al final, se adelgaza hasta el vacío en el espacio interplanetario. Sin em- ***F I G U R A 1 4 .1***

bargo, incluso en las regiones vacías del espacio interplanetario hay una

densidad de La atmósfera. El aire está más com-gas de aproximadamente una molécula por centímetro cúbico. Éste es principalmente primido a nivel del mar que a mayores altitudes. Como las plumas en una

hidrógeno, el elemento más abundante del Universo. Alrededor de 50% de la atmós- enorme pila, lo que está en el fondo está fera está por debajo de una altitud de 5.6 km (18,000 ft), 75% está por debajo de más apretado que lo que está más cerca 11 km (36,000 ft), 90% está por debajo de 18 km (60,000 ft) y 99% está por debajo de la parte superior.

de alrededor de 30 km (100,000 ft) (Figura 14.1). En varios sitios web puedes encontrar una descripción detallada de la atmósfera.

Los gases y los líquidos fluyen; por

tanto, ambos se llaman fluidos.

Un gas se expande de manera inde-

finida y llena todo el espacio que

tiene a su disposición. Sólo cuando

P U N T O D E C O N T R O L

la cantidad de gas es muy gran-

¿Por qué a veces tus oídos se tapan cuando cambias de altitud, por decir, *de, como en la atmósfera de un*

en el elevador de un rascacielos o al descender en un avión?

planeta o una estrella, las fuerzas

gravitacionales restringen el tama-

ño o la forma de un gas.

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Un cambio de altitud significa un cambio en la presión del aire, como se estudia en la siguiente sección, y esto causa un desequilibrio temporal en las presiones sobre los Hacia una bomba

dos lados de tu tímpano.

de vacío

***14.2** Presión atmosférica*

La humanidad vive en el fondo de un océano de aire. La atmósfera, muy parecida al agua de un lago, ejerce presión. Por ejemplo, cuando se reduce la presión del aire dentro de un cilindro como el que se muestra en la Figura 14.2, hay una fuerza ascendente sobre el pistón procedente del aire exterior. Esta fuerza es suficientemente grande como para levantar un gran peso. Si el diámetro interior del cilindro es de 10 cm o ***F I G U R A 1 4 . 2***

más, una persona puede quedar suspendida por esta fuerza.

¿El pistón que soporta la carga es jalado

Contrario a la creencia común, lo que el experimento de la Figura 14.2 no muestra o empujado hacia arriba?

es la "fuerza de succión". Si se dice que hay una fuerza de succión, entonces se supone que un vacío puede ejercer una fuerza. ¿Pero qué es un vacío? Es ausencia de materia; es una condición de nada. ¿Cómo la nada puede ejercer una fuerza? El pistón que sostiene el peso en la Figura 14.2 no es succionado hacia arriba. El pistón es empujado hacia Muchas criaturas de las profundida-arriba por el peso de la atmósfera contra su superficie inferior.

des marinas experimentan enormes

Así como la presión del agua es causada por el peso del agua, la ***presión atmosféri-presiones de agua sobre su cuerpo,***

ca es causada por el peso del aire. Las personas se han adaptado tan completamente al pero no sufren efectos dañinos.

Como tú en el fondo de la atmós-

aire invisible que no lo sienten y en ocasiones se olvidan que tiene peso. Quizás un pez fera de la Tierra, ninguna fuerza o

"olvida" el peso del agua en la misma forma. La razón por la que no sienten que este tensión neta se ejercen sobre ellos

peso presiona contra su cuerpo es que la presión en el interior de su cuerpo equilibra porque las presiones dentro de sus

la presión del aire circundante. No hay una fuerza neta que sentir.

cuerpos coinciden con la presión de

A nivel del mar, 1 m3 de aire tiene una masa aproximada de 1.25 kg. ¡De modo que fluido a su alrededor. Para muchas

el aire en la recámara de tu hermana menor pesa aproximadamente tanto como ella! La criaturas, mas no para todas, los

densidad del aire disminuye con la altitud. A 10 km, por ejemplo, 1 m3 de aire tiene problemas ocurren cuando cambian

de profundidad muy súbitamen-

una masa de aproximadamente 0.4 kg. Para compensar esto, los aviones están presuri-te. Los buzos, por ejemplo, que

zados; el aire adicional necesario para presurizar por completo un moderno jumbo jet, cometen el error de subir a la

superficie muy rápidamente ex-

perimentan dolor y pueden morir

por la rápida descompresión, un

trastorno conocido como "enfer-

medad de los buzos" (síndrome de

descompresión). [El término inglés

Scuba (escafandra) es un acrónimo

de Self-contained Underwater

Breathing Apparatus: aparato de

respiración subacuática autóno-

mo.] Los biólogos marinos buscan

F I G U R A 1 4 . 3

métodos para llevar a la superficie

No percibes el peso de una bolsa de agua mientras

a las criaturas de las profundidades

estás sumergido en agua. De igual modo, no estás

marinas, sensibles a la profundidad,

consciente del peso del aire mientras estás sumergido

sin matarlas.

en un "océano" de aire.

por ejemplo, es de más de 1,000 kg. El aire es pesado si tienes suficiente de él. Si tu hermana menor no cree que el aire tenga peso, le puedes demostrar por qué ella percibe falsamente que el aire no tiene peso. Si le das una bolsa de plástico llena de agua, te dirá que tiene peso. Pero, si le das la misma bolsa de agua mientras está sumergida en una alberca, no sentirá su peso. Eso se debe a que ella y la bolsa están rodeadas de agua. Lo mismo sucede con el aire que te rodea.

Piensa en la masa de aire en un poste de bambú erguido de 30 km de alto que tiene un área transversal interior de 1 cm2. Si la densidad del aire en el interior del poste coincide con la densidad del aire exterior, la masa de aire encerrado sería de aproximadamente 1 kg. El peso de todo este aire es de cerca de 10 N. De modo que la presión del aire en el fondo del poste de bambú sería de unos 10 N por centímetro cuadrado (10 N/cm2). Desde luego, lo mismo es cierto sin el poste de bambú. Hay 10,000 cm2 en 1 m2, de modo que una columna de aire de 1 m2 de sección transversal que se extiende hacia arriba a través de la atmósfera tiene una masa de aproximadamente 10,000 kg. El peso de este aire es de más o menos

100,000 N (105 N). Este peso produce una presión F I G U R A 1 4 . 4

de 100,000 N/m2 o, de manera equivalente, 100,000 pascales o 100 kilopascales. Para La masa de aire que ocuparía un poste ser más exactos, la presión atmosférica promedio a nivel del mar es de 101.3 kilopas- de bambú que se extiende 30 km hacia cales (101.3 kPa).1

arriba, hasta la "parte superior" de la

La presión de la atmósfera no es uniforme. Además de las variaciones con la altitud, atmósfera, es de aproximadamente 1 kg.

Este aire pesa aproximadamente 10 N.

la presión atmosférica varía de una ubicación a otra y de un día a otro. Esto conduce a frentes climáticos en movimiento y a tormentas que conforman el clima. Cuando se aproxima un sistema de alta presión, puedes esperar temperaturas más frías y cielos despejados. Cuando se aproxima un sistema de baja presión, espera un clima más cálido, lluvia y tormentas. La medición de los cambios de la presión del aire es importante para los meteorólogos cuando predicen el clima.

SCREENCAST: Presión atmosférica

F I G U R A 1 4 . 6

El peso del aire que soporta una

superficie de 1 m2 a nivel del mar es de

F I G U R A 1 4 . 5

aproximadamente 100,000 N. En otras

Ann Brandon fascina a sus estudiantes cuando viaja

palabras, la presión atmosférica es de

sobre un colchón de aire al que le sopla por un orificio

más o menos 105 N/m2, o alrededor de

en medio de este gran disco de aire.

100 kPa.

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Aproximadamente cuántos kilogramos de aire ocupan un salón de clase que tiene 200 m2 de área de suelo y un techo de 4 m de alto? (Supón VIDEO: El aire tiene peso

una temperatura fría de 10ºC.)

2. ¿Por qué la presión de la atmósfera no rompe ventanas?

1El pascal (1 N/m2) es la unidad del SI de presión. La presión promedio a nivel del mar (101.3 kPa) con frecuencia se llama 1 atmósfera. En unidades británicas, la presión atmosférica promedio a nivel del mar es 14.7 lb/in2.

VIDEO: El aire es materia

268

PA R T E D OS

P RO P I EDA D ES D E L A M AT ER I A

T A B L A 1 4 . 1

DENSIDADES DE VARIOS GASES

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. A temperatura normal del salón de clase, la masa de aire es 1,000 kg. El volumen Gas

*Densidad (kg/m3)**

del aire es área 3 altura 5 200 m2 3 4 m 5 800 m3; cada metro

cúbico de aire tiene Aire seco

una masa aproximada de 1.25 kg, de modo que 800 m3 3 1.25 kg/ m3 5 1,000 kg.

0˚C

1.29

2. La presión atmosférica se ejerce sobre ambos lados de una ventana, de modo 10˚C

1.25

que sobre el vidrio no se ejerce fuerza neta. Si, por alguna razón, la presión se redujera o aumentara sólo en un lado, como cuando pasa un tornado, ¡entonces 20˚C

1.21

cuidado! La reducción de la presión de aire exterior creada por un tornado puede 30˚C

1.16

ser desastrosa.

Hidrógeno

0.090

Helio

0.178

Nitrógeno

1.25

Oxígeno

1.43

El barómetro

**A presión atmosférica a nivel del mar*

En 1643, el físico y matemático italiano Evangelista Torricelli descubrió una forma y 0°C (a menos que se especifique de

de medir la presión que ejerce el aire: inventó el primer barómetro. En la Figura 14.7

otro modo).

se ilustra un barómetro de mercurio simple. Consiste en un tubo de vidrio lleno de mercurio, un poco más largo que 76 cm, sumergido en un plato (depósito) de mercurio. Cuando Torricelli volteó de cabeza el tubo lleno de mercurio y colocó la boca hacia abajo en un plato de mercurio, el mercurio del tubo descendió a un nivel donde su peso en el tubo se equilibró con la fuerza atmosférica ejercida sobre el depósito. El espacio vacío atrapado arriba, excepto por algo de vapor de mercurio, es un vacío. La altura vertical de la columna de mercurio permanece constante aun cuando el tubo se incline, a menos que la parte superior del tubo esté a menos de 76 cm sobre el nivel del plato, en cuyo caso el mercurio llena por completo el tubo.

760 mm

El equilibrio del mercurio en un barómetro es similar a la manera en que un subibaja se equilibra cuando los momentos de torsión de las personas en sus dos extremos son iguales. El barómetro se "equilibra" cuando el peso del líquido en el tubo ejerce la misma presión que la atmósfera exterior. Cualquiera sea el ancho del tubo, una columna de 76 cm de mercurio pesa lo mismo que el aire que llenaría un tubo súper alto de 30 km del mismo ancho. Si la presión atmosférica aumenta, entonces la atmósfera empuja hacia abajo con más fuerza sobre el mercurio y la columna F I G U R A 1 4 . 7

de mercurio es empujada más alto que 76 cm. El mercurio literalmente es empujado Un barómetro de mercurio simple.

hacia adentro del tubo de un barómetro por el peso de la atmósfera. La presión atmosférica se midió por la altura de una columna de mercurio en un barómetro, y con frecuencia todavía se expresa en milímetros o pulgadas de mercurio. La unidad científica más común es el kilopascal.

¿Podría usarse agua para fabricar un barómetro? La respuesta es sí, pero el tubo de vidrio tendría que ser mucho más largo: 13.6 veces más largo, para ser exactos.

Puedes reconocer este número como la densidad del mercurio en

relación con la del agua. Para obtener el mismo peso que el mercurio del tubo se necesita un volumen de agua 13.6 veces el del mercurio. De modo que el tubo tendría que ser al menos 13.6 veces más alto que la columna de mercurio. Un barómetro de agua tendría que medir 13.6 3 0.76 m, o 10.3 m de alto, muy alto para ser práctico.

Lo que ocurre en un barómetro es similar a lo que sucede durante el proceso de beber por una pajilla. Al succionar en las pajillas colocadas en la bebida, reduces la presión del aire en la pajilla. El peso de la atmósfera sobre la bebida empuja el líquido hacia arriba, hacia la región con presión reducida en el interior de la pajilla. Estrictamente hablando, el líquido no se succiona; lo empuja hacia arriba la presión de la atmósfera. Si se impide F I G U R A 1 4 . 8

que la atmósfera presione sobre la superficie de la bebida, como en la botella de truco Estrictamente hablando, estos dos no

con la pajilla que pasa a través de un tapón de corcho hermético, uno puede succionar succionan la gaseosa por las pajillas

y succionar y no obtener la bebida.

(popotes). Más bien, reducen la presión

Si entiendes estas ideas, puedes comprender por qué hay un límite de 10.3 m en la en las pajillas y permiten que el peso

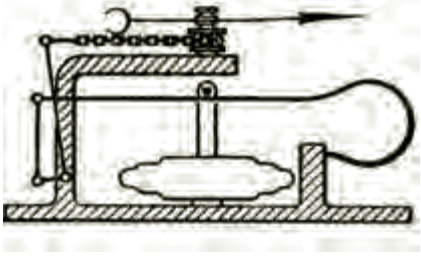
altura a la que puede levantarse el agua con bombas de vacío. Las bombas antiguas de de la atmósfera empuje el líquido hacia

arriba de las pajillas. ¿Podrían beber una

las haciendas, como la que se muestra en la Figura 14.9, funcionan mediante la pro-gaseosa de esta forma en la Luna?

ducción de un vacío parcial en una tubería que se extiende hacia los mantos acuíferos

Stormy
Rain
Change
Fair
Very Dry



Cuando se bombea de la manija,

el aire en la tubería se “adelgaza”

mientras se expande para llenar un

volumen más grande. La presión

atmosférica sobre la superficie del

pozo empuja el agua hacia arriba

por la tubería, lo que hace que el

agua se desborde por el pico.

F I G U R A 1 4 . 9

La atmósfera empuja el agua desde abajo hacia una tube-

F I G U R A 1 4 . 1 0

ría que es parcialmente evacuada de aire por la acción de

Un barómetro aneroide (arriba) y su

bombeo.

sección transversal (abajo).

bajo ella. El peso de la atmósfera sobre la superficie del agua simplemente empuja el agua hacia la región donde se redujo la presión en el interior de la tubería. ¿Puedes ver que, incluso con un vacío perfecto, la altura máxima a la que puede elevarse el agua es

de 10.3 m?

Un pequeño instrumento portátil que mide la presión atmosférica

Pistón

es el barómetro aneroide. El modelo clásico que se muestra en la Figura 14.10 usa una caja metálica que está parcialmente vacía de aire y

Pistón

tiene una tapa un poco flexible que se dobla adentro o afuera con los cambios de la presión atmosférica. El movimiento de la tapa se indica en una escala con un sistema mecánico de resorte y palanca. Dado

que la presión atmosférica disminuye con la altitud, un barómetro

Admisión

Escape

Admisión

Escape

puede usarse para determinar la elevación. Un barómetro aneroide F I G U R A 1 4 .11

calibrado para medir la altitud se denomina altímetro (medidor de al- Una bomba de vacío mecánica. Cuando el pistón se levanta, titud). Algunos altímetros son suficientemente sensibles para indicar la válvula de admisión se abre y el aire entra para llenar al un cambio de elevación de menos de un metro.

espacio vacío. Cuando el pistón se desplaza hacia abajo, la

Los vacíos se producen con bombas, que funcionan en virtud de válvula de escape se abre y el aire se empuja hacia afuera.

un gas que tiende a llenar su depósito. Si se proporciona un espacio ¿Qué cambios harías para convertir esta bomba en un com-con menos presión, el gas fluirá desde la región de mayor presión presor de aire?

hasta la región de menor presión. Una bomba de vacío simplemente

proporciona una región de menor presión hacia la cual se mueven al azar las rápidas moléculas de gas. La presión del aire disminuye en forma repetida mediante la acción de un pistón y una válvula (Figura 14.11). Los mejores vacíos alcanzables con bombas mecánicas son de aproximadamente 1 Pa. Los mejores vacíos, abajo de 1028 Pa, se Para los vuelos internacionales,

logran con bombas de difusión de vapor o de chorro de vapor. Las bombas de sublima-una presión de cabina de tres cuar-

ción pueden alcanzar 10212 Pa. Vacíos más grandes son muy difíciles de lograr.

tos la presión atmosférica normal

es lo mínimo permitido.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Cuál es la máxima altura a la que puede succionarse agua por una pajilla?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

A nivel del mar, por más fuertes que sean tus pulmones, o cualquier dispositivo que uses para crear un vacío en la pajilla, la atmósfera no puede empujar el agua más alto que 10.3 m.

270

PA R T E D OS

P RO P I EDA D ES D E L A M AT ER I A

14.3 Ley de Boyle

La presión del aire en el interior de los neumáticos inflados de un automóvil es mucho mayor que la presión atmosférica externa. La densidad del aire adentro también es mayor que la densidad del aire exterior. Para entender la relación entre presión y densidad, piensa en las moléculas de aire (principalmente nitrógeno y oxígeno) dentro del neumático, que se comportan como pequeñas pelotas de ping-pong: se mueven en forma continua sin orden ni concierto y chocan entre sí y contra las paredes interiores. Sus impactos producen una fuerza muy agitada que a tus sentidos parece como un empuje constante. Esta fuerza de empuje promediada sobre una unidad de área proporciona la presión del aire encerrado.

Supón que hay el doble de moléculas en el mismo volumen (Figura 14.12). Entonces la densidad del aire se duplica. Si las moléculas se mueven con la misma rapidez F I G U R A 1 4 . 1 2

promedio o, de manera equivalente, si tienen la misma temperatura, entonces el nú-Cuando la densidad del gas de los

neumáticos aumenta, la presión se

mero de colisiones se duplica. Esto significa que la presión se duplica. De modo que la incrementa.

presión es proporcional a la densidad.

También puedes duplicar la densidad del aire si comprimes el aire a

la mitad de su volumen. Considera el cilindro con el pistón móvil de la Figura 14.13. Si el pistón se baja, de modo que el volumen sea la mitad del volumen original, la densidad de las

¿La presión atmosférica realmente

moléculas se duplica y la presión se duplica en correspondencia. Reduce el volumen a difiere con algunos centímetros

un tercio de su valor original y la presión aumenta por tres, y así sucesivamente (siempre de diferencia en altitud? El hecho de

que la temperatura permanezca constante y el número de moléculas permanezca igual).

que sí lo es se demuestra con cualquier

globo lleno de helio que se eleva

en el aire. La presión atmosférica

ascendente contra la superficie

inferior del globo es mayor que la

presión atmosférica descendente

F I G U R A 1 4 . 1 3

contra la parte superior.

Cuando el volumen de gas dismi-

nuye, su densidad, y por tanto su

presión, aumentan.

Observa en este ejemplo con pistones que presión y volumen son inversamente proporcionales; si duplicas uno, por ejemplo, reduces el otro a la mitad.2 Esto se puede VIDEO: El aire tiene presión

escribir como:

P 1

V

donde P representa presión y V volumen. Esta relación puede

escribirse como: Un manómetro de presión de aire

PV 5 constante

en una estación de servicio no

Otra forma de expresarlo es:

mide la presión absoluta de aire.

Un neumático ponchado registra

P V 5 P V

1 1

2 2

una presión cero en el manóme-

tro, pero ahí existe una presión de

Aquí, P y V representan la presión y volumen originales, respectivamente, y P y V

1

1

2

2

aproximadamente 1 atmósfera.

representan la segunda presión y volumen. O, puesto de manera más gráfica, Los manómetros leen la presión

"manométrica": una presión ma-

PV 5 PV

yor que la presión atmosférica.

Esta relación entre la presión y el volumen se llama ley de Boyle, en honor al físico Robert Boyle, quien, con la ayuda de su amigo físico Robert Hooke, hizo este descubrimiento en el siglo XVII. La ley de Boyle se aplica a los gases ideales. Un gas ideal es aquel en el que los

efectos perturbadores de las fuerzas entre moléculas y el tamaño finito de las moléculas individuales pueden despreciarse. El aire y otros gases bajo SCREENCAST: Ley de Boyle

presiones normales se aproximan a condiciones de gas ideal.

2Una ley general que tiene en cuenta los cambios de temperatura es P V / T 5 P V / T , donde T y T repre-1 1

1

2 2

2

1

2

sentan las temperaturas absolutas primera y segunda, medidas en la unidad del SI llamada kelvin (consulta los Capítulos 15 y 18).

C A PÍ T U LO 14 G A SES

271

P U N T O D E C O N T R O L

1. Un pistón de una bomba hermética se retira de modo que el volumen de Los trabajadores en construc-la cámara de aire aumenta tres veces. ¿Cuál es el cambio de presión?

ciones submarinas laboran en un

***2. Un buzo a 10.3 m de profundidad respira aire comprimido. Si tuviera** ambiente de aire comprimido. La*

presión del aire en sus cámaras

***que contener su respiración mientras regresa a la superficie, ¿en cuánto** submarinas es al menos tan alta*

tendería a aumentar el volumen de sus pulmones?

como la presión combinada del

agua y la atmósfera exterior.

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *La presión en la cámara del pistón se reduce a un tercio. Éste es el principio que subyace a una bomba de vacío mecánica.*

2. *La presión atmosférica puede soportar una columna de agua de 10.3 m de alto, de modo que la presión en el agua debida a su peso sólo iguala la presión atmosférica a una profundidad de 10.3 m. Si se tiene en cuenta la presión de la at mósfera en la superficie del agua, la presión total a esta profundidad es el doble de la presión atmosférica. Por desgracia para el buzo, sus pulmones ten-derán a inflarse al doble de su tamaño normal si retiene su respiración mientras sube a la superficie. Una primera lección en el buceo es no retener la respiración cuando asciendes. Hacerlo puede ser mortal.*

14.4 *Flotabilidad del aire*

Un cangrejo vive en el fondo de su océano de agua y mira hacia arriba una medusa que flota sobre él. De igual modo, tú vives en el fondo de un océano de aire y miras hacia arriba los globos que flotan sobre ti. Un globo está suspendido en el aire y una medusa está suspendida en el agua por la misma razón: cada uno flota hacia arriba por un peso desplazado de fluido igual a su propio peso. En un caso, el fluido desplazado es aire; en ***VIDEO: Flotabilidad del aire***

el otro caso, es agua. Como estudiaste en el Capítulo 13, los objetos en el agua flotan hacia arriba porque la presión que actúa hacia arriba contra la parte de abajo del objeto supera la presión que actúa hacia abajo contra la parte de arriba. De manera similar, la presión del aire que actúa hacia arriba contra un objeto en el aire es mayor que la presión arriba que empuja hacia abajo. La flotabilidad, en ambos casos, es numéricamente igual al peso del fluido desplazado. El ***principio de Arquímedes*** *se sostiene para el aire tal como lo hace para el agua:*

Un objeto rodeado de aire es sostenido por una fuerza igual al peso del aire desplazado.

Se sabe que un metro cúbico de aire a presión atmosférica ordinaria y temperatura ambiente tiene una masa de aproximadamente 1.2 kg, de modo que su peso es de más o menos 12 N. Por ende, cualquier objeto de 1 m3 en el aire es sostenido con una fuerza de 12 N. Si la masa del objeto de 1 m3 es mayor que 1.2 kg (de modo que su peso es mayor que 12 N), cae al suelo cuando se lo suelta. Si un objeto de este tamaño ***F I G U R A 1 4 .1 4***

tiene una masa menor que 1.2 kg, se eleva en el aire. Cualquier objeto que

tenga una Todos los cuerpos son sostenidos por masa menor que la masa de un volumen igual de aire se elevará en el aire. Otra forma una fuerza igual al peso del aire que desplazan. ¿Por qué entonces no todos

de decir esto es que cualquier objeto menos denso que el aire se elevará en el aire. Los los objetos flotan como este globo?

globos llenos de gas que se elevan en el aire son menos densos que el aire.

La mayor flotabilidad se lograría si un globo fuera evacuado, pero esto no es práctico. El peso de una estructura necesaria para evitar el colapso de un globo evacuado contrarrestaría más de la cuenta la ventaja de la flotabilidad adicional. De modo que los globos se llenan con un gas menos denso que el aire ordinario, lo que evita que el globo colapse al tiempo que se mantiene ligero. En los globos deportivos, el gas es simplemente aire caliente. En los globos hechos para alcanzar muy grandes alturas o para permanecer arriba un tiempo prolongado, por lo general se usa helio. Su densidad es suficientemente baja, de modo que el peso combinado del helio, el globo y cualquiera ***SCREENCAST: Flotabilidad de globos***

que sea la carga es menor que el peso del aire que desplaza.3 En un globo se usa gas de baja densidad por la misma razón que en el chaleco salvavidas de un nadador se usan corcho o espuma de estireno. El corcho o la espuma de estireno no poseen una tendencia extraña para ser arrastrados hacia la superficie del agua, y el gas no posee una tendencia extraña para elevarse. Ambos flotan hacia arriba como cualquier otra cosa.

Son simplemente lo bastante ligeros como para que la flotabilidad sea significativa.

A diferencia del agua, la atmósfera no tiene una superficie definible. No hay "arriba".

Más aún, a diferencia del agua, la atmósfera se vuelve menos densa con la altitud. Mientras que el corcho flota hacia la superficie del agua, un globo lleno de helio que se suelta no se elevará hacia ninguna superficie atmosférica. ¿Qué tan alto subirá un globo? La respuesta ***F I G U R A 1 4***

se puede indicar de varias formas. Un globo lleno de gas se elevará sólo en tanto desplace (Izquierda) A nivel del suelo, el globo

un peso de aire mayor que su propio peso. Puesto que el aire se vuelve menos denso con la está parcialmente inflado. (Derecha) El

altitud, a medida que el globo se eleva desplaza un peso de aire menor por volumen dado.

mismo globo está totalmente inflado a

Ya que la mayoría de los globos se expande cuando se elevan, su flotabilidad permanece grandes alturas, donde la presión circun-bastante constante hasta que ya no pueden expandirse más. Cuando el peso del aire des-dante es menor.

plazado es igual al peso total del globo, el movimiento ascendente del globo cesará. También es posible decir que, cuando la fuerza de flotación sobre el globo es igual a su peso, el globo dejará de subir. De manera equivalente, cuando la densidad del globo (incluida su carga) es igual a la densidad del aire circundante, el globo dejará de subir. Los globos de juguete llenos de helio por lo general se rompen cuando se sueltan en el aire porque la expansión del helio que contienen estira el hule hasta que se rompe. Los grandes dirigibles Un banco típico de nubes de buen

están diseñados para que, cuando se carguen, se eleven lentamente en el aire; esto es: su tamaño contiene más o menos

peso total es un poco menor que el peso del aire desplazado. Cuando está en movimiento, un millón de toneladas de agua,

la nave puede subir o bajar mediante "elevadores" horizontales.

todas en forma de gotas de agua

Hasta el momento sólo se ha abordado la presión como se aplica a fluidos estacio-suspendidas.

narios. El movimiento produce una influencia adicional.

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Existe una fuerza de flotación que actúe sobre ti? Si la hay, ¿por qué tú no flotas por esta fuerza?

2. (¡Ésta requiere un buen razonamiento!) ¿Cómo cambia la flotabilidad a SCREENCAST: Problemas

de flotabilidad en aire

medida que asciende un globo lleno de helio?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Existe una fuerza de flotación que actúa sobre ti, y tú eres empujado hacia arriba por ella. No la aprecias sólo porque tu peso es mucho mayor.*

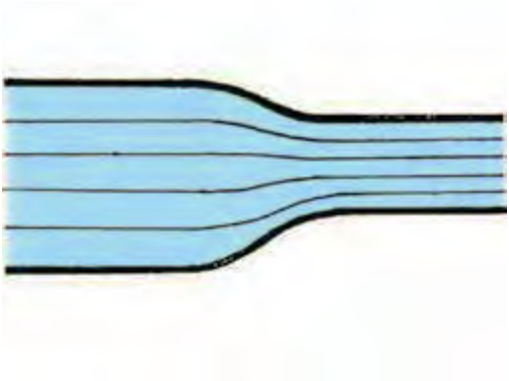
2. *Si el globo es libre de expandirse conforme se eleva, el aumento de volumen es con-trarrestado por una disminución de la densidad del aire a mayor altitud. Así que, es interesante que el mayor volumen del aire desplazado no pese más, y la flotabilidad permanezca igual. Si un globo no tiene libertad para expandirse, disminuirá la flotabilidad a medida que el globo se eleve, debido a que el aire desplazado es menos denso. Por lo general, al principio los globos se expanden conforme se elevan y, si finalmente no se rompen, el estiramiento de su tela llega a un máximo y se asientan donde su flotabilidad coincide con su peso. Como muestra la Figura 14.15, los globos de grandes alturas parecen estar muy desinflados cuando se les lanza.*

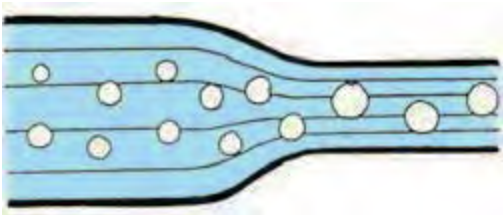
14.5 *El principio de Bernoulli*

Considera un flujo continuo de agua por una tubería. Puesto que el agua no se "amontona", la cantidad de agua que fluye por cualquier sección dada de la tubería es la misma que la cantidad que fluye por cualquiera otra sección de la misma tubería, incluso si la tubería se ensancha o estrecha. Para un flujo continuo, un fluido acelera cuando ***SCREENCAST: El principio***

de Bernoulli

3El hidrógeno es el gas menos denso y se usó en globos que transportaban pasajeros, desde finales del siglo XVIII hasta mediados del siglo XX. Sin embargo, dado que el hidrógeno es altamente inflamable, como lo demostró el desastre del Hindenburg en 1937, rara vez se usa.





pasa de una parte ancha a una estrecha de la tubería y frena cuando pasa de una parte estrecha a una ancha de la tubería. Esto es evidente en un río ancho que se mueve lento y fluye más rápidamente cuando entra a una garganta estrecha que tenga la misma profundidad. También es evidente cuando el agua que fluye de una manguera acelera cuando oprimes el extremo de la manguera para hacer el chorro más estrecho.

Este cambio de rapidez con el cambio de la sección transversal es consecuencia de lo que se conoce como principio de continuidad, que es el tema de los dos recuadros pti de esta página. Para que el flujo sea continuo

en una región confinada, acelera cuando se mueve de una región más ancha a una más estrecha.

El movimiento de un fluido en flujo estacionario sigue líneas de corriente imagina- ***F I G U R A 1 4 .1 6***

rias, representadas por líneas delgadas en la Figura 14.17 y en otras figuras que siguen. Dado que el flujo es continuo, el agua Las líneas de corriente son trayectorias suaves de fluido. Las líneas están más juntas en acelera cuando fluye por la parte estrecha o poco profunda del arroyo.

regiones más estrechas, donde la rapidez del flujo es mayor. (Las líneas de corriente son visibles cuando el humo u otros fluidos visibles pasan por aberturas uniformemente espaciadas, como en un túnel de viento.)

Daniel Bernoulli, un científico suizo del siglo xviii, estudió el flujo de fluidos por las tuberías. Su descubrimiento, ahora llamado ***principio de Bernoulli****, puede enun-Dado que el volumen de agua que*

ciarse del modo siguiente:

fluye por una tubería con diferen-

Donde la rapidez de un fluido aumenta, la presión interna del fluido disminuye.

tes áreas transversales A permane-

Y viceversa: donde la rapidez disminuye, la presión interna aumenta. Esto se aplica ce constante, la rapidez de flujo v

es alta donde el área es pequeña,

cuando la fricción, la turbulencia y los cambios de altitud no afectan la presión. El y la rapidez es baja donde el área

principio se aplica al flujo que sigue su curso continuo por líneas de corriente.

es grande. Esto se indica en la

Donde las líneas de corriente de un fluido están más juntas, la rapidez del flujo es ecuación de continuidad:

mayor y la presión dentro del fluido es menor. Los cambios en la presión interna son A v 5 A v

1 1

2 2

evidentes cuando el agua contiene burbujas de aire (Figura 14.18). El volumen de una El producto A v en cualquier pun-1 1

burbuja de aire depende de la presión del agua circundante. Donde el agua adquiere to 1 es igual al producto A v en el

2 2

rapidez, la presión se reduce y las burbujas se vuelven más grandes. En el agua que punto 2.

frena, la presión aumenta y las burbujas se oprimen hasta un tamaño menor.

– v

–

A

v

1

2

A

1

2

F I G U R A 1 4 . 1 7

F I G U R A 1 4 . 1 8

El agua acelera cuando entra en la

La presión interna es mayor cuando el agua se

tubería más estrecha. Las líneas de

mueve lentamente en la parte ancha de la tubería,

corriente más juntas indican un

como lo demuestran las burbujas de aire más opri-

aumento de rapidez y una disminu-

midas. Las burbujas son más grandes en la parte

ción de la presión interna.

estrecha porque ahí la presión interna es menor.

Una forma de aumentar en gran medida la presión de un fluido es llevarlo con rapidez al reposo (a lo que se conoce como presión estática). Si alguna vez has tenido la mala suerte de ser golpeado por un cañón de agua, has experimentado el efecto. Recuerda del Capítulo 6 que un gran cambio en la cantidad de movimiento se asocia a un gran Si alguna vez te has preguntado

impulso. De manera que, cuando el agua proveniente de un cañón de agua te golpea, cómo las brisas ligeras se convier-el impulso puede derribarte. Incluso, las modernas máquinas cortadoras pueden usar ten en vientos briosos en la cima

un chorro de agua a gran rapidez para cortar acero.

de una montaña, ¡piensa en el

El principio de Bernoulli es una consecuencia de la conservación de la energía, aunque, principio de continuidad! Aunque

ahí no hay tubería que restrinja

sorprendentemente, él la desarrolló mucho antes de que se formalizara el concepto de el flujo de aire, no obstante se

energía.4 El principio también se deduce de la segunda ley de movimiento de Newton.

restringe y acelera de la misma

En cualquier caso, el principio de Bernoulli se aplica a un flujo estacionario suave (llam-manera.

ado flujo laminar) de fluido con densidad constante. Sin embargo, a rapideces mayores 4En forma matemática: 1/2 mv 2 1 mg y 1 pV 5 constante (a lo largo de una línea de corriente); donde m es la masa de

algún volumen pequeño V, v su rapidez, g la aceleración de la gravedad, y su elevación y p su presión interna. Si la masa m se expresa en términos de densidad, r, donde r 5 m/ V, y cada término se divide por V, la ecuación de Bernoulli se lee: 1/2 rv 2 1 r g y 1 p 5 constante. Entonces los tres términos tienen unidades de presión. Si y no cambia, un aumento de v significa una disminución de p, y viceversa. Observa que, cuando v es cero, la ecuación de Bernoulli se reduce a D p 5 2r g D y (densidad de peso 3 profundidad).

que cierto punto crítico, el flujo puede volverse caótico (llamado flujo turbulento) y seguir trayectorias curvas cambiantes, llamadas remolinos. Esto ejerce fricción sobre el fluido y disipa parte de su energía. Entonces la ecuación de Bernoulli no se aplica bien.

Una manguera contra incendios

El cuadro completo de la energía de un fluido en movimiento es bastante compli-es gorda cuando no vierte agua.

cado. Dicho de manera simple, más rapidez y mayor energía cinética significan menos Cuando el agua se activa y la manguera chorrea, ¿por qué se vuelve

presión, mientras que más presión significa menos rapidez y menor energía cinética.

más delgada?

Aplicaciones del principio de Bernoulli

Quienquiera que haya viajado en un convertible con el techo de lona puesto habrá notado que el techo se abomba hacia arriba cuando el automóvil se mueve. ¡Éste es Bernoulli en acción! La presión exterior contra el techo de tela, donde el aire aumenta su rapidez al moverse arriba y sobre el automóvil, es menor que la presión atmosférica estática dentro del automóvil. El resultado es una fuerza neta ascendente sobre la tela.

Piensa en el viento que sopla a través de un techo en punta. Tal como un líquido adquiere rapidez cuando entra en una tubería estrecha, el viento adquiere rapidez pues igualmente se restringe al fluir arriba y sobre el

techo. Adquiere rapidez como indica el apiñamiento de las líneas de corriente de la Figura 14.19. La presión a lo largo de las ***F I G U R A 1 4 . 1 9***

líneas de corriente se reduce donde están más juntas. La mayor presión en el interior La presión del aire arriba del techo es

del techo puede levantarlo de la casa. Durante una tormenta fuerte, la diferencia entre menor que la presión del aire abajo del

las presiones exterior e interior no necesita ser muy grande. Una pequeña diferencia de techo.

presión a través de un área grande produce una fuerza que puede ser tremenda.

Si piensas en el techo desprendido como en el ala de un avión, podrás entender mejor la fuerza de sustentación que sostiene una pesada aeronave. En ambos casos, una mayor presión por abajo empuja el techo o el ala hacia una región de menor presión arriba. Las alas vienen en una variedad de diseños. Lo que todos ellos tienen en común es que el aire se hace fluir más rápido sobre la superficie superior del ala que bajo su superficie inferior. Esto se logra principalmente mediante una inclinación en el ala, llamado ángulo de ataque. Entonces el aire fluye más rápido sobre la superficie superior en gran medida por ***F I G U R A 1 4 . 2 0***

El vector vertical representa la fuerza

la misma razón por la que el aire fluye más rápido en una tubería estrecha o en cualquiera ascendente neta (sustentación) que resul-otra región constreñida. Con frecuencia, mas no siempre, diferentes rapideces de flujo de ta de mayor presión de aire bajo el ala

aire arriba y abajo de un ala se aumentan mediante una diferencia en la curvatura (comba) que arriba del ala. El vector horizontal

de las superficies superior e inferior del ala. El resultado son líneas de corriente más apiña-representa el arrastre aerodinámico.

das a lo largo de la superficie superior del ala que a lo largo de la parte inferior. Cuando la diferencia de presión promedio sobre el ala se multiplica por el área superficial del ala, se tiene una fuerza ascendente neta: sustentación.5 La sustentación es mayor cuando hay una gran área de ala y cuando el avión viaja rápido. Un deslizador

Movimiento de aire en relación con la pelota

tiene un área de ala muy grande en relación con su peso, de modo

que no tiene que ir muy rápido para tener suficiente sustentación.

B

En el otro extremo, un avión de combate diseñado para un vuelo

de gran rapidez tiene un área de ala pequeña en relación con su

peso. En consecuencia, debe despegar y aterrizar a gran rapidez.

A

Todo mundo sabe que un lanzador de béisbol puede impar-

tir un giro a una pelota para hacer que se curve hacia un lado

mientras se aproxima al home. De igual modo, un jugador de

(a)

(b)

tenis puede golpear una bola de modo que haga una curva. Una

F I G U R A 1 4 . 2 1

delgada capa de aire se arrastra por fricción alrededor de la bola

(a) Las líneas de corriente son las mismas en cualquier lado de una

que gira, que aumenta con las costuras de la pelota de béisbol o

pelota de béisbol que no gira. (b) Una pelota que gira produce un apicon las pelusas de la bola de tenis.6 La capa de aire en movimien-

ñamiento de líneas de corriente. La "sustentación" resultante (flecha to produce un apiñamiento de líneas de corriente en un lado.

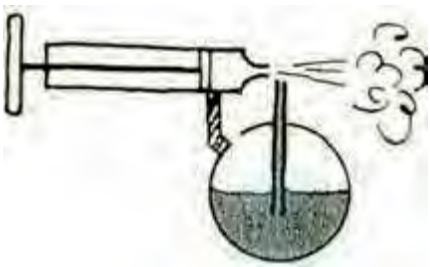
roja) hace que la bola se curve, como se muestra con la flecha azul.

5Las diferencias de presión sólo son una forma de entender la sustentación del ala. Otra forma consiste en usar la tercera ley de Newton. El ala fuerza el aire hacia abajo (acción) y el aire fuerza el ala hacia arriba (reacción).

El aire se desvía hacia abajo por la inclinación del ala, el ángulo de ataque, ¡incluso cuando vuela de cabeza!

Cuando viajes en un automóvil, saca la mano por la ventanilla y pretende que es un ala. Inclínala un poco de modo que el aire se fuerce hacia abajo. ¡Tu mano se eleva! La sustentación del aire brinda un buen ejemplo para recordarte que con frecuencia hay más de una forma de explicar el comportamiento de la naturaleza.

6Estrictamente hablando, el principio de Bernoulli se aplica al flujo de un fluido libre de fricción. Si estudias la curvatura de las bolas aún más, busca el efecto Magnus, que tiene que ver con fricción y la viscosidad.



Dobla una tarjeta de archivo y forma un pequeño puente o túnel. Colócala sobre una mesa y sopla por el arco como se muestra. Sin importar cuán fuerte soples, no lograrás tirar la tarjeta de la mesa (a menos que soples contra el lado de la tarjeta). Intenta esto con tus amigos que no han cursado física. ¡Luego explícale a tus amigos!

Observa en la Figura 14.21b que las líneas de corriente están más apiñadas en B que en A para la dirección de giro que se muestra. La presión del aire es mayor en A y la bola hace la curva que se muestra.

Descubrimientos recientes muestran que muchos insectos aumentan su sustentación cuando emplean movimientos similares a los de una pelota de béisbol que hace una curva. Es interesante que la mayoría de los insectos no batan sus alas arriba y abajo. Las baten adelante y atrás, con una inclinación que proporciona un ángulo de ata- ***F I G U R A 1 4 . 2 2***

que. Entre batidos, sus alas hacen movimientos semicirculares para crear sustentación. ¿Por qué el líquido del depósito sube por Un conocido rociador manual utiliza el principio de Bernoulli (Figura 14.22). el tubo?

Cuando oprimes la pera de goma, el aire se fuerza desde un canal más ancho hacia uno más estrecho y sale con menor presión que la presión

atmosférica normal arriba del extremo abierto de un tubo

insertado en el flujo de líquido. La presión atmosférica so-

bre el líquido abajo empuja entonces al líquido hacia arriba

por el tubo, donde es transportado por el chorro de aire.

El principio de Bernoul i explica por qué los camiones

que pasan cerca en la autopista se atraen entre sí, y por qué los

barcos que pasan juntos corren el riesgo de una colisión late-

ral. El agua que fluye entre los barcos viaja más rápido que el

agua que fluye por los lados exteriores. Las líneas de corriente

están más juntas entre los barcos que afuera, de modo que la

presión del agua que actúa contra las quil as se reduce entre ***F I G U R A 1 4 . 2 3***

los barcos. Incluso una pequeña reducción de presión contra Amarra

holgadamente un par de botes de juguete, uno al lado del otro, el área superficial relativamente enorme de los lados de los en tu fregadero. Luego dirige un chorro de agua entre ellos. Los botes se barcos puede producir una fuerza significativa. A menos que juntarán y chocarán. ¿Por qué?

los barcos se dirijan para compensar esto, la mayor presión

contra los lados exteriores de los barcos los fuerza a juntarse. La Figura 14.23 muestra cómo demostrar esto en el fregadero de tu cocina o en la tina de baño.

¡Saludos para ti

El principio de Bernoulli tiene algo que ver cuando la cortina de la regadera se ba-también,

lancea hacia ti en el baño cuando el agua sale a su máxima capacidad. La presión en el Daniel Bernoulli!

espacio de la regadera se reduce ligeramente con el fluido en movimiento, y la presión relativamente mayor en el exterior de la cortina la empuja hacia adentro. Al igual que muchas cosas en el complejo mundo real, éste no es más que un solo principio físico aplicado en esta situación. Más importante es la convección del aire en la regadera. En cualquier caso, la siguiente vez que tomes una ducha y la cortina se balancee hacia tus piernas, piensa en Daniel Bernoulli.

F I G U R A 1 4 . 2 4

La forma curva de una sombrilla puede

ser desventajosa en un día ventoso.

P U N T O D E C O N T R O L

Un día ventoso produce olas en un lago o el

Viento

océano. ¿Cómo ayuda el principio de Bernoulli a

crear ondas más altas?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

SCREENCAST: Aplicaciones

Los valles de las olas están parcialmente protegidos del viento, de modo que el aire via-de Bernoulli

ja más rápido sobre las crestas. Por tanto, la presión sobre las crestas es menor que en los valles. La mayor presión en los valles empuja el agua hacia arriba, hacia las crestas.

14.6 Plasma

Además de sólidos, líquidos y gases, hay una cuarta fase de la materia: **plasma** (no la confundas con la parte líquida y transparente de la sangre, también llamada plasma). El plasma es la fase menos común en el entorno cotidiano, pero es la fase de la materia más prevaleciente en el Universo como totalidad. El Sol y otras estrel as son principalmente plasma.

Un plasma es un gas electrificado. Los átomos que lo constituyen están ionizados, despojados de uno o más electrones, con un número correspondiente de electrones libres. Recuerda que un átomo neutro tiene tantos protones positivos dentro del núcleo como electrones negativos afuera del núcleo. Cuando uno o más de esos electrones se desprenden del átomo, el átomo tiene más carga positiva que negativa y se convierte en un ion positivo. (Bajo algunas condiciones, puede tener electrones adicionales, en cuyo caso es un ion negativo.) Aunque electrones e iones tienen carga eléctrica, el plasma como totalidad es eléctricamente neutro porque todavía hay igual número de cargas positivas y negativas, tal como las hay en un gas ordinario. No obstante, un plasma y un gas tienen propiedades muy diferentes.

El plasma conduce fácilmente la corriente eléctrica, absorbe ciertos tipos de radiación que pasan libremente a través de un gas, y se le puede dar forma, moldearse y moverse mediante campos eléctricos y magnéticos.

El Sol es una bola de plasma caliente. En los laboratorios de la Tierra se crean plasmas mediante gases calentados a muy altas temperaturas, lo que los hace tan calientes que los electrones “hierven” en los átomos. Los plasmas también pueden crearse a temperaturas más bajas al bombardear átomos con partículas o radiación de alta energía.

F I G U R A 1 4 . 2 5

En la noche, las calles se iluminan con

plasmas que brillan.

Plasma en el mundo cotidiano

Si lees esto a la luz emitida por una lámpara fluorescente o una bombil a

fluorescente compacta, no tienes que buscar mucho para ver el plasma en acción. Dentro del tubo bril ante hay plasma que contiene iones de argón y mercurio (así como muchos átomos neutros de dichos elementos). Cuando enciendes la lámpara, un alto voltaje entre electrodos en cada extremo del tubo provoca un flujo de electrones. Estos electrones ionizan algunos átomos y forman plasma, que brinda una ruta de conducción que mantiene el flujo de la corriente. La corriente activa algunos átomos de mercurio y eso los hace emitir radiación, principalmente en la región ultravioleta invisible. Esta radiación hace que el recubrimiento de fósforo en la superficie interior del tubo bril e con luz visible.

De igual modo, el gas neón de un anuncio publicitario se convierte en plasma cuando sus átomos se ionizan mediante bombardeo de electrones. Los átomos de neón, después de activarse por la corriente eléctrica, emiten luz predominantemente roja. Los diferentes colores que se ven en dichos anuncios corresponden a plasma compuesto por diferentes tipos de átomos. El argón, por ejemplo, tiene brillo azul, y el helio brilla en rosa. Las lámparas de vapor de sodio utilizadas en la iluminación de las calles emiten luz amarilla estimulada por plasmas que brillan (Figura 14.25).

Las pantallas planas de TV de plasma están compuestas por muchos miles de píxeles, cada uno compuesto a su vez de tres celdas de subpíxel separadas. Una celda tiene un fósforo que brilla en rojo, otra tiene un fósforo que brilla en verde y la otra azul. Los píxeles están en medio de una red de electrodos que se cargan miles de veces en una pequeña fracción de segundo, lo que produce corrientes eléctricas que fluyen a través de gases en las celdas. Como en una lámpara fluorescente, los gases se convierten en plasmas brillantes que liberan luz ultravioleta que estimula los fósforos. La imagen so-F I G U R A 1 4 . 2 6

bre la pantalla es la mezcla de colores de píxel activados por la señal de control del TV.

En una TV de plasma, plasmas bri-

La aurora boreal y la aurora austral (llamadas luces del norte y luces del sur, respec-llantes encienden cientos de miles de

tivamente) son plasmas brillantes en la atmósfera superior. Capas de plasma de baja pequeños píxeles en rojo, verde o azul.

temperatura envuelven toda la Tierra. En ocasiones, lluvias de electrones provenientes Estos colores se combinan en diferentes proporciones para producir todo el

del espacio exterior y los cinturones de radiación entran a las “ventanas

magnéticas”

espectro de color.

cerca de los polos de la Tierra, chocan con las capas de plasma y producen luz.

C A PÍ T U LO 14 R E V ISI Ó N

277

Electricidad plasmática

Un plasma de mayor temperatura es el escape de un motor jet, un plasma débilmente ionizado. Pero cuando se agregan pequeñas cantidades de sales de potasio o metal ceLas ondas de radio y TV de alta fre-

cuencia pasan a través de la atmósfe-

sio, se convierte en un muy buen conductor y, cuando se dirigen hacia un imán, ¡pue-ra y hacia el espacio. En consecuen-

den generar electricidad! Ésta es energía MHD, la interacción ***m****agneto****h****idro****d****inámica cia, tienes que estar en la “línea de*

entre un plasma y un campo magnético. (En el Capítulo 25 se abordará la mecánica de mira” de las antenas de transmisión o

la generación de electricidad de esta forma.) La energía MHD de baja contaminación relevo para recoger las señales de FM

ya se usa en algunos lugares del mundo. Espera un poco, quizás verás más energía de y TV. Pero las capas de plasma a unos

plasma con MHD.

80 km de altura, que constituyen la

ionosfera, reflejan las ondas de radio

Un logro incluso más prometedor será la energía de plasma de un tipo diferente: de baja frecuencia. Eso explica por

la fusión controlada de núcleos atómicos. En el Capítulo 34 se abordará el tema de la qué puedes escuchar estaciones de

física de la fusión. Los beneficios de la fusión controlada pueden ser

trascendentales.

radio de larga distancia en tu radio

La energía de fusión puede no sólo hacer abundante la energía eléctrica, sino también AM de frecuencia más baja. En la

proporcionar la energía y los medios para reciclar e incluso sintetizar elementos.

noche, cuando las capas de plasma se

La humanidad ha avanzado mucho con el dominio de las tres primeras fases de la juntan más y son más reflejantes, en

ocasiones puedes recibir estaciones

materia. El dominio de la cuarta fase puede llevarla mucho más lejos.

muy distantes en tu radio AM.

R E S U M E N D E T É R M I N O S *(C O N O C I M I E N T O)*
Presión atmosférica. *Presión que se ejerce contra los cuerpos* ***Principio de Arquímedes (para aire).*** *Un objeto en el aire es inmersos en la atmósfera. Resulta del peso del aire que*

sostenido con una fuerza igual al peso del aire desplazado.

oprime hacia abajo desde arriba. A nivel del mar, la presión

Principio de Bernoulli. *Donde la rapidez de un fluido*

atmosférica es de aproximadamente 101 kPa.

aumenta, la presión interna del fluido disminuye.

Barómetro. *Dispositivo que mide la presión atmosférica.*

Plasma. *Gas electrificado que contiene iones y electrones libres.*

Ley de Boyle. *El producto de la presión y el volumen es una*

La mayor parte de la materia en el Universo está en la fase de

constante para una masa dada de gas confinado, en tanto la

plasma.

temperatura permanezca invariable:

P V 5 P V

1 1

2 2

***P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S** (C O M P R E N S I Ó N)*
14.1 La atmósfera

8. ¿Cómo se compara el peso del mercurio en un barómetro,

1. ¿Cuál es la fuente de energía para el movimiento del gas

con el peso de una sección transversal igual de aire, desde

en la atmósfera? ¿Qué evita que los gases atmosféricos

el nivel del mar hasta lo alto de la atmósfera?

vuelen hacia el espacio?

9. ¿Por qué un barómetro de agua tendría que ser 13.6 veces

2. ¿Qué tan alto tendrías que ir en la atmósfera para que la

más alto que un barómetro de mercurio?

mitad de la masa del aire esté abajo de ti?

10. Cuando bebes líquido por una pajilla, ¿es más exacto

decir que el líquido es empujado hacia arriba por la pajilla

14.2 Presión atmosférica

que succionado por la pajilla? ¿Exactamente cómo se

3. ¿Cuál es la causa de la presión atmosférica?

realiza el empuje? Defiende tu respuesta.

4. ¿Cuál es la masa de un metro cúbico de aire a

11. ¿Por qué una bomba de vacío no funcionará para un pozo

temperatura ambiente (208C)?

que tenga más de 10.3 m de profundidad?

5. ¿Cuál es la masa aproximada de una columna de aire de

12. ¿Por qué un barómetro aneroide puede medir altitud, así

1 cm2 de área que se extiende desde el nivel del mar hasta

como presión atmosférica?

la atmósfera superior? ¿Cuál es el peso de esta cantidad

14.3 Ley de Boyle

de aire?

13. ¿En cuánto aumenta la densidad del aire cuando se

6. ¿Cuál es la presión en el fondo de la columna de aire a la

comprime a la mitad de su volumen?

que se refiere la pregunta anterior?

14. ¿Qué ocurre con la presión del aire dentro de un globo

7. ¿Cómo se compara la presión en el fondo de una

cuando se apachurra a la mitad de su volumen a tempera-

columna de mercurio de 76 cm en un barómetro, con

tura constante?

la presión del aire en el fondo de la atmósfera?

15. ¿Qué es un gas ideal?

14.4 Flotabilidad del aire

23. ¿El principio de Bernoulli se refiere a cambios en la

16. Un globo que pesa 1 N está suspendido en aire, y no

presión interna de un fluido o a presiones que el fluido

viaja ni hacia arriba ni hacia abajo. (a) ¿Cuánta fuerza

puede ejercer sobre los objetos?

de flotación actúa sobre él? (b) ¿Qué ocurre si la fuerza de

24. ¿Cómo es que el aire que se mueve rápidamente sobre el

flotación disminuye? (c) ¿Si aumenta?

ala de un avión afecta la presión sobre el ala?

17. ¿El aire ejerce fuerza de flotación sobre todos los objetos

25. ¿Cómo es que el agua que se mueve rápidamente entre

en el aire o sólo sobre los objetos como los globos que son

dos barcos afecta la presión del agua contra los lados de

muy ligeros para su tamaño?

los barcos?

18. ¿Por qué los globos de investigación para grandes alturas

26. ¿Los barcos de la pregunta anterior son succionados o

sólo están inflados parcialmente cuando se lanzan?

empujados uno hacia el otro? Explica.

14.5 Principio de Bernoulli

27. ¿El fluido que sube por el interior del tubo en un rociador

de mano es empujado hacia arriba del tubo o succionado

19. ¿Qué son las líneas de corriente?

hacia arriba del tubo? Explica.

20. ¿La presión es mayor o menor en las regiones donde las

líneas de corriente están más juntas?

14.6 Plasma

21. ¿Qué ocurre con la presión interna de un fluido que fluye

28. ¿Cómo difiere un plasma de un gas?

en una tubería horizontal cuando su rapidez aumenta?

29. Cita al menos tres ejemplos de plasma en tu entorno diario.

22. ¿Qué ocurre con la presión interna de un fluido que fluye

30. ¿Qué puede producirse cuando un haz de plasma se

en una tubería horizontal cuando su rapidez disminuye?

dirige hacia el campo de un fuerte imán?

P I E N S A Y R E A L I Z A *(A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 31. Compara la presión ejercida por los neumáticos de tu*

superficie. ¿Por qué no escapa el agua? ¿Cuán alto tendría

automóvil sobre el camino, con la presión del aire en los

que ser un vaso antes de que el agua comience a salir?

neumáticos. Para este proyecto, necesitas conocer el peso

(No podrás hacer esto en el interior a menos que tengas

de tu automóvil, que puedes conseguir en un manual o

un techo que esté al menos 10.3 m más arriba del nivel

con un vendedor de autos. Divide el peso entre 4 para

del agua.)

obtener el peso aproximado que sostiene un neumático.

34. Coloca una tarjeta sobre la parte superior de un vaso

Puedes aproximar bastante el área de contacto de un

lleno hasta el borde con agua y voltéalo. ¿Por qué la

neumático con el camino si trazas los bordes de contacto

tarjeta permanece en su lugar? Inténtalo hacia los lados.

del neumático sobre una hoja de papel marcada con

cuadrados de 1 pulgada abajo del

neumático. Después de calcular

la presión del neumático contra

el camino, compárala con la

presión del aire en el neumático.

¿Son casi iguales? Si no es así,

¿cuál es mayor?

32. En general, para verter agua de un vaso lleno a un vaso vacío

35. Invierte una botella de gaseosa o un frasco con cuello

simplemente se coloca el vaso lleno arriba del vaso vacío y

delgado llenos de agua. Observa que el agua no

se inclina. ¿Alguna vez has vertido aire de un vaso a otro?

simplemente cae, sino que borbotea del recipiente. La

El procedimiento es similar. Sumerge dos vasos en agua,

presión del aire no lo dejará escapar sino hasta que algo

con las bocas hacia abajo. Deja que uno se llene con agua

de aire entre en la botella para ocupar el espacio de

al inclinar su boca hacia arriba. Luego sostén boca abajo

arriba del líquido. ¿Cómo se vaciaría en la Luna una

la boca del vaso lleno de agua arriba del vaso lleno de aire.

botella invertida llena de agua?

Inclina lentamente el vaso inferior y deja que el aire escape

y llene el vaso superior. ¡Verterás aire de un vaso a otro!

36. Calienta una pequeña cantidad de agua para

que hierva en una lata de aluminio de gaseosa e

inviértela rápidamente en un plato de agua más fría.

¡Sorprendentemente espectacular!

37. Inserta en agua un tubo de vidrio estrecho o

pajilla y coloca tu dedo sobre la parte superior

del tubo. Levanta el tubo del agua y luego

retira el dedo de lo alto del tubo. ¿Qué ocurre?

(Harás esto con frecuencia si te inscribes en

33. Eleva sobre el nivel del agua un vaso sumergido boca

un laboratorio de química.)

abajo lleno del líquido, pero con su boca bajo la

C A PÍ T U LO 14 R E V ISI Ó N

279

38. Con un alfiler, perfora una tarjeta pequeña y colócala en

39. Sostén una cuchara en un chorro de agua, como se

el orificio de un carrete de hilo. Intenta separar la tarjeta

muestra, y siente el efecto de la diferencia de presiones.

del carrete al soplar por el orificio, como Evan Jones hace

en una de las fotografías al inicio del capítulo. Inténtalo

en todas direcciones.

P I E N S A Y R E S U E L V E *(A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 40. Estima la fuerza de flotación que ejerce el aire sobre ti.*

El peso total del globo, incluida su carga y el aire caliente

(Para hacer esto, puedes estimar tu volumen si conoces

en él, es 20,000 N.

tu peso y supones que tu densidad de peso es un poco

a. Demuestra que el peso del aire desplazado es 20,000 N.

menor que la del agua.)

b. Demuestra que el volumen del aire desplazado es 1,700 m3.

41. Un amigo escalador, con una masa de 80 kg, considera

43. Considera un avión con una superficie de ala total de

la idea de amarrarse un globo lleno de helio para reducir

100 metros cuadrados. A cierta rapidez, la diferencia en

de una manera efectiva su peso en 25% cuando escale.

la presión del aire abajo y arriba de las alas es de 4% la

Se pregunta de qué tamaño aproximado sería tal globo.

presión atmosférica. Demuestra que la sustentación sobre

Al escuchar de tus habilidades en física, te pregunta.

el avión es 400,000 N.

Comparte con él tus cálculos que muestren que el

volumen del globo debe ser de aproximadamente 17 m3

44. El peso de la atmósfera sobre 1 metro cuadrado de

(un poco más de 3 m de diámetro para un globo esférico).

superficie de la Tierra es de alrededor de 100,000 N. Desde

luego, la densidad disminuye con la altitud. Pero supón que

42. En un perfecto día de otoño, flotas a baja altitud en un

la densidad del aire fuera constante en 1.2 kg/m3. Calcula

globo aerostático, que no acelera ni arriba ni abajo.

dónde estaría la parte superior de la atmósfera.

***P I E N S A Y C L A S I F I C A** (A N Á L I S I S)*

45. Clasifica los volúmenes de aire en el vaso, de mayor a

47. Clasifica de mayor a menor las cantidades de sustentación

menor, cuando se sostiene

sobre las siguientes alas de avión:

a. cerca de la superficie como se muestra.

a. 1,000 m2 de área, con diferencia de presión atmosférica

b. 1 m bajo la superficie.

de 2.0 N/m2.

c. 2 m bajo la superficie.

b. 800 m2 de área, con diferencia de presión atmosférica

46. Clasifica las fuerzas de flotación que

de 2.4 N/m2.

proporciona la atmósfera sobre los

c. 600 m2 de área, con diferencia de presión atmosférica

siguientes, de mayor a menor:

de 3.8 N/m2.

a. un elefante.

b. un globo de fiesta lleno de helio.

c. un paracaidista a velocidad terminal.

***P I E N S A Y E X P L I C A** (S Í N T E S I S)*

48. Se dice que un gas ocupa todo el espacio disponible

el aire. Si el diámetro del vástago de la válvula se duplica,

para él. ¿Por qué, entonces, la atmósfera no sale hacia el

¿en cuánto aumentaría la fuerza ejercida por el vástago de

espacio?

la válvula?

49. ¿Por qué no hay atmósfera en la Luna?

52. ¿Por qué un balón blando de fútbol parcialmente inflado

50. ¿Por qué la presión en los neumáticos de un automóvil

a nivel del mar es mucho más firme cuando se lleva a una

es ligeramente mayor después de que el automóvil se ha

mayor altura en las montañas?

conducido durante varios kilómetros?

53. ¿Cuál es el propósito de las crestas

51. El vástago de la válvula de un neumático debe ejercer

que evitan que el embudo se ajuste

cierta fuerza sobre el aire interior para evitar que escape

firmemente en la boca de una botel a?

PA R T E D OS

P RO P I EDA D ES D E L A M AT ER I A

54. ¿Cómo se compara la densidad del aire en una mina pro-

68. ¿Por qué una báscula de precisión proporciona lecturas

funda, con la densidad del aire en la superficie de la Tierra?

diferentes para el peso de un objeto en aire y en un vacío

55. Cuando una burbuja de aire se eleva en el agua, ¿qué

(recuerda que el peso es la fuerza ejercida contra una

ocurre con su masa, su volumen y su densidad?

superficie de soporte)? Cita un ejemplo en el que esto

56. ¿Por qué supones que las ventanas de los aviones son más

sería una consideración importante.

pequeñas que las ventanas de los autobuses?

69. ¿Una botella de gas helio pesaría más o menos que una

57. Es posible entender cómo la presión en el agua depende de

botella idéntica llena de aire a la misma presión? ¿Que

la profundidad si piensas en una pila de ladril os. La presión

una botella idéntica con el aire extraído?

bajo el ladril o inferior está determinada

70. Cuando sustituyes helio en un globo con hidrógeno menos

por el peso de toda la pila. A la mitad

denso, ¿la fuerza de flotación sobre el globo cambia si el

de la pila, la presión es la mitad, porque

globo permanece del mismo tamaño? Explica.

el peso de los ladril os que están encima

71. Un tanque de acero lleno de gas helio no se eleva en el

es la mitad. Para explicar la presión

aire, pero un globo que contiene el mismo helio se eleva

atmosférica, debes considerar ladril os

con facilidad. ¿Por qué?

comprimibles, como los hechos con

72. Si el número de átomos de gas en un recipiente se dupli-

espuma de caucho. ¿Por qué esto es así?

ca, la presión del gas se duplica (si supones temperatura y

58. La "bomba" en una aspiradora es sim-

volumen constantes). Explica este aumento de presión en

plemente un ventilador de gran rapidez. ¿Una aspiradora

términos del movimiento molecular del gas.

recogería polvo de una alfombra en la Luna? Explica.

73. ¿Qué cambio de presión ocurre en un globo que se oprime

59. Supón que la bomba que se muestra en la Figura 14.9

a un tercio de su volumen sin cambio de temperatura?

opera con un vacío perfecto. ¿A partir de qué

74. ¿Qué, si algo, ocurre con el volumen del gas en un globo

profundidad podría bombear agua de un pozo?

de investigación atmosférica cuando se calienta?

60. Si un líquido sólo la mitad de denso que el mercurio se

75. ¿Qué sucede con la presión del gas en un globo de caucho

usara en un barómetro, ¿cuán alto sería su nivel en un día

cuando el globo se oprime para hacerlo más pequeño?

de presión atmosférica normal?

76. ¿Qué ocurre con el tamaño de las burbujas de aire

61. ¿Por qué el tamaño del área transversal de un barómetro

liberadas por un buzo mientras ascienden?

de mercurio no afecta la altura de la columna de

77. Tú y tu amistoso vendedor de automóviles ponen a flotar

mercurio encerrada?

una larga cadena de globos llenos de helio muy cercanos

62. ¿Desde qué profundidad podría extraerse mercurio de un

entre sí sobre su lote de autos usados. Sujetas los dos

recipiente con un sifón?

extremos de la larga cadena de globos a diferentes puntos

63. Si de algún modo pudieras sustituir con un líquido más

sobre el suelo, de modo que los globos flotan sobre el lote

denso el mercurio de un barómetro de mercurio, ¿la

en un arco. ¿Cuál es el nombre de este arco? (¿Por qué

altura de la columna de líquido sería mayor o menor que

este ejercicio podría incluirse en el Capítulo 12?)

la altura del mercurio? ¿Por qué?

78. La presión del gas dentro de un globo de caucho inflado

64. ¿Sería un poco más difícil extraer gaseosa por una pajilla

siempre es mayor que la presión del aire exterior. Explica.

a nivel del mar o en la cima de una montaña muy alta?

79. La fuerza de la atmósfera a nivel del mar contra el

Explica.

exterior de una ventana de 10 m2 de un almacén es de

65. ¿Por qué es tan difícil respirar con un snorkel a una profun-
aproximadamente un millón N. ¿Por qué esto no rompe

didad de 1 m y prácticamente imposible a una profundidad

la ventana? ¿Por qué la ventana puede romperse con un

de 2 m? ¿Por qué un buzo simplemente no puede respirar

fuerte viento que sople en la ventana?

por una manguera que se extienda hasta la superficie?

80. ¿Por qué el fuego de un hogar arde más vigorosamente en

66. Una niña pequeña sentada en un automóvil en un semáforo

un día ventoso?

sostiene un globo lleno de helio. Las ventanas están cerra-

81. ¿Qué ocurre con la presión del agua conforme acelera

das y el automóvil es relativamente hermético. Cuando la

cuando sale por la boquilla de una manguera de jardín?

luz se pone verde y el automóvil acelera hacia adelante, su

82. ¿Por qué los aviones por lo general despegan de frente al

cabeza va hacia atrás pero el globo hacia adelante.

viento?

Explica por qué.

83. ¿Qué proporciona la sustentación para mantener un

frisbee en vuelo?

84. Cuando un gas que fluye estacionariamente fluye de una

tubería con mayor diámetro a una tubería con menor

diámetro, ¿qué ocurre con (a) su rapidez, (b) su presión y

(c) el espaciamiento entre sus líneas de corriente?

85. Compara el espaciamiento de las líneas de corriente

alrededor de una pelota de béisbol lanzada que no gira

67. ¿Cómo es que el concepto de flotabilidad complica la

en vuelo, con el espaciamiento de las líneas de corriente

vieja pregunta: “qué pesa más: una libra de plomo o una

alrededor de una que sí lo hace. ¿Por qué la pelota de

libra de plumas"?

béisbol que gira se desvía del curso de una que no gira?

C A PÍ T U LO 14 R E V ISI Ó N

86. ¿Por qué es más fácil lanzar una curva con una bola de
autopista, tu automóvil tiende a bambolearse hacia el
tenis que con una pelota de béisbol?
camión. El techo de lona de un automóvil convertible se
87. ¿Por qué los aviones extienden alerones que aumentan el
abomba hacia arriba cuando el automóvil viaja a grandes
área y el ángulo de ataque del ala durante los despegues y
rapideces. Las ventanas de los trenes antiguos en ocasio-
los aterrizajes? ¿Por qué dichos alerones se retraen cuando
nes se rompen cuando un tren de gran rapidez pasa junto
el avión llega a rapidez de crucero?
a ellos en la vía vecina.
88. ¿Cómo es que un avión puede volar boca abajo?
92. Los embarcaderos están hechos con pilotes que permiten
89. ¿Por qué las pistas de despegue son más largas para los
el libre paso del agua. ¿Por qué un embarcadero con una
despegues y aterrizajes en los aeropuertos a gran altitud,
pared sólida sería desventajoso para las embarcaciones
como Denver y la Ciudad de México?
que intenten atracar a su lado?
90. ¿Cómo se moverán dos hojas de papel que cuelgan vertical-
mente cuando soples entre ellas? Inténtalo y observa.
91. ¿Qué principio físico subyace a estas tres observacio-

nes? Cuando pasa un camión que se aproxima por la

PIENSA Y DISCUTE *(EVALUACIÓN)*

93. Si cuentas los neumáticos de un gran camión con
en los extremos de una vara que se equilibra horizontal-
remolque que descarga alimentos en tu supermercado
mente. Entonces se pincha uno de los globos. Discute
local, puede que te sorprenda contar 18 neumáticos. ¿Por
si el equilibrio de la vara se altera o no. Si es así, ¿en qué
qué tantos neumáticos? (Sugerencia: considera el Piensa y
sentido se inclina?
realiza número 31.)
94. Dos equipos de ocho caballos cada uno no pudieron
separar los hemisferios de Magdeburgo (que se muestran
en la página de inicio de este capítulo). Supón que dos
equipos de nueve caballos cada uno pudieran separarlos.
Entonces, ¿un equipo de nueve caballos lo lograría si el
otro equipo se sustituyera con un fuerte árbol? Discute
101. Dos globos que tienen el mismo peso y volumen se
esto y defiende tu respuesta.
llenan con iguales cantidades de helio. Uno es rígido y el
95. Cuando abordas un avión, llevas una bolsa de papas fri-
otro es libre de expandirse conforme la presión exterior
tas (o cualquier otro objeto empacado en una bolsa her-
disminuye. Cuando se liberan, discute cuál se elevará

mética) y, mientras estás en vuelo, observas que la bolsa

más alto.

revienta. Discute por qué ocurre esto.

102. Un globo lleno de helio y un balón de básquetbol tienen el

96. La presión ejercida contra el suelo por el peso de un ele-

mismo volumen. ¿Sobre cuál es mayor la fuerza de flota-

fante, distribuida equitativamente sobre sus cuatro patas,

ción del aire circundante? Discute por qué el globo está

es menor que 1 atmósfera. Discute: ¿por qué serías aplas-

en el techo de una habitación mientras que el balón está en

tado bajo la pata de un elefante, mientras que no resultas

el suelo.

dañado por la presión de la atmósfera?

103. Imagina una enorme colonia espacial que consista en un

97. Tu amigo dice que la fuerza de flotación de la atmósfera

cilindro giratorio lleno de aire. Discute cómo se compa-

sobre un elefante es significativamente mayor que la

raría la densidad del aire "a nivel del suelo" con las densi-

fuerza de flotación de la atmósfera sobre un pequeño

dades del aire "arriba".

globo lleno de helio. Discute tu respuesta.

104. Discute si un globo lleno de helio podría "elevarse" en la

98. Discute cuál registrará mayor peso: un globo aplanado

atmósfera de un hábitat espacial giratorio.

vacío o el mismo globo lleno de aire. Defiende tu res-

105. Discute si la presión más baja es resultado o no de aire

puesta; luego inténtalo y observa.

que se mueve rápidamente, o el aire que se mueve rápi-

99. En una báscula sensible, pesa una delgada bolsa plástica

damente es resultado de una presión más baja. Ofrece

plana y vacía. Luego pesa la bolsa llena de aire. Discute si

un ejemplo que sustente cada punto de vista. (En física,

las lecturas diferirán o no diferirán.

cuando dos cosas se relacionan, como fuerza y acele-

100. Dos globos idénticos del mismo volumen se bombean

ración o rapidez y presión, por lo general es arbitrario

con aire a más de la presión atmosférica y se suspenden

a cuál se le llama causa y a cuál se le llama efecto.)

P A R T E D O S *Examen de práctica de opción múltiple*

Elige la MEJOR respuesta a cada una de las siguientes preguntas:

11. Un objeto completamente sumergido siempre desplaza su

propio(a)

1. Si dos protones y dos neutrones se retiran de un núcleo de

(a) peso de fluido.

neón-20, ¿un núcleo de cuál elemento permanece?

(b) volumen de fluido.

(a) Magnesio-12.

(c) densidad de fluido.

(b) Magnesio-20.

(d) Todo lo anterior.

(c) Oxígeno-18.

12. Una roca suspendida de una báscula pesa 5 N fuera del agua y

(d) Oxígeno-16.

3 N cuando se sumerge en agua. ¿Cuál es la fuerza de flotación

2. El núcleo de un átomo de hierro eléctricamente neutro contiene

sobre la roca?

26 protones. El número de electrones que tiene este átomo de

(a) 3 N

hierro es

(b) 5 N

(a) 52.

(c) 8 N

(b) 26.

(d) Ninguna de las anteriores.

(c) 24.

13. En un vacío, un objeto no tiene

(d) Ninguno.

(a) fuerza de flotación.

3. ¿Cuántos electrones hay en la tercera capa del sodio, Na (núme-

(b) masa.

ro atómico 11)?

(c) peso.

(a) Ninguno.

(d) Todas las anteriores.

(b) Uno.

14. La presión atmosférica se debe a

(c) Dos.

(a) el peso de la atmósfera.

(d) Tres.

(b) el peso y el volumen de la atmósfera.

4. Los cristales que constituyen los minerales están compuestos de

(c) la densidad de peso y el volumen de la atmósfera.

(a) átomos con un arreglo geométrico definido.

(d) el peso del planeta Tierra.

(b) moléculas que se mueven de manera perpetua.

15. Considera dos barómetros de mercurio, uno que tiene un área

(c) patrones de rayos X.

transversal de 1 cm2 y el otro 2 cm2. La altura de mercurio en el

(d) tableros de ajedrez tridimensionales.

tubo más estrecho es

5. Si el volumen de un objeto se duplica, sin cambio en su masa,

(a) la mitad.

su densidad

(b) el doble.

(a) se reduciría a la mitad.

(c) la misma.

(b) se duplicaría.

(d) Ninguna de las anteriores.

(c) sería la misma.

16. Un barómetro que usa agua en lugar de mercurio será

(d) Ninguna de las anteriores.

(a) más corto.

6. De acuerdo con la ley de Hooke, si cuelgas de la rama de un

(b) más alto.

árbol y observas cuánto se dobla, entonces al colgar el doble de

(c) de la misma altura.

peso se produce

(d) inoperable.

(a) la mitad del doblado.

17. Cuando oprimes un globo lleno de aire aumentas su

(b) el mismo doblado si la rama no se rompe.

(a) volumen.

(c) el doble de doblado.

(b) masa.

(d) 4 veces el doblado.

(c) peso.

7. Cuando doblas la rama de un árbol al colgarte por su extremo,

(d) densidad.

el lado superior de la rama está bajo

18. En la operación de una prensa hidráulica, el pistón de salida no

(a) tensión.

puede

(b) compresión.

(a) moverse más lejos que el pistón de entrada.

(c) Ambas.

(b) superar la fuerza de entrada.

(d) Ninguna.

(c) superar la rapidez del pistón de entrada.

8. Cuando escalas un objeto hasta 3 veces su tamaño lineal, el

(d) producir un aumento de energía.

área superficial aumenta por

19. El vuelo de un dirigible ilustra mejor

(a) 3 y el volumen por 9.

(a) el principio de Arquímedes.

(b) 3 y el volumen por 27.

(b) el principio de Pascal.

(c) 9 y el volumen por 27.

(c) el principio de Bernoulli.

(d) 4 y el volumen por 8.

(d) la ley de Boyle.

9. La piedra pómez es una roca volcánica que flota en el agua. La

20. Cuando el viento acelera mientras sopla sobre lo alto de una

densidad de la piedra pómez, comparada con la del agua, es

colina, la presión atmosférica ahí

(a) menor.

(a) aumenta.

(b) igual.

(b) disminuye.

(c) mayor.

(c) no es afectada.

(d) ninguna, pues se hunde.

(d) se reduce a cero.

10. La presión en el fondo de un estanque NO depende de

(a) la aceleración debida a la gravedad.

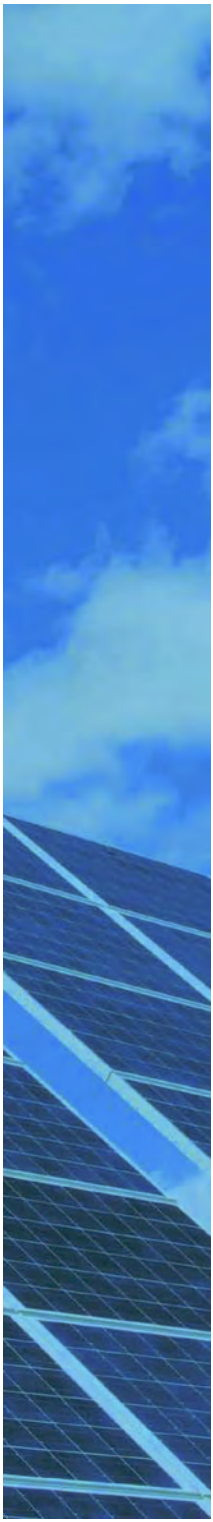
Después de hacer elecciones razonadas, y discutirlas con tus

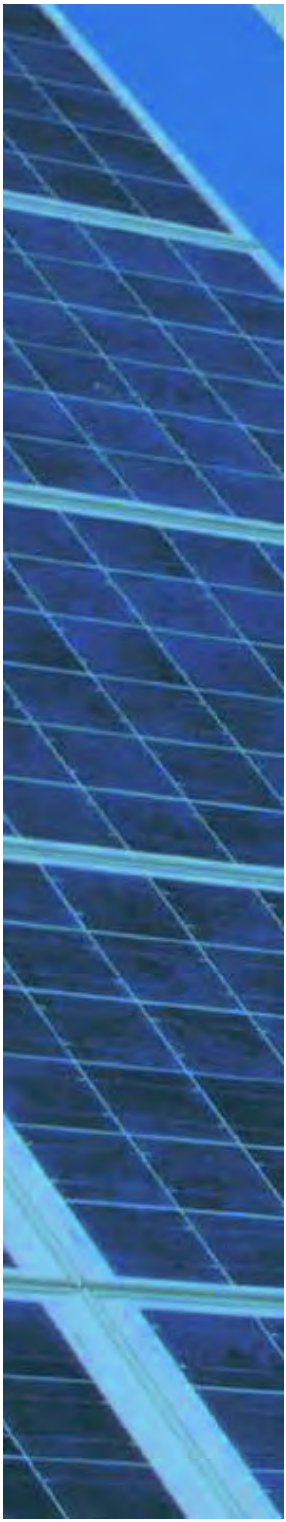
(b) la densidad del agua.

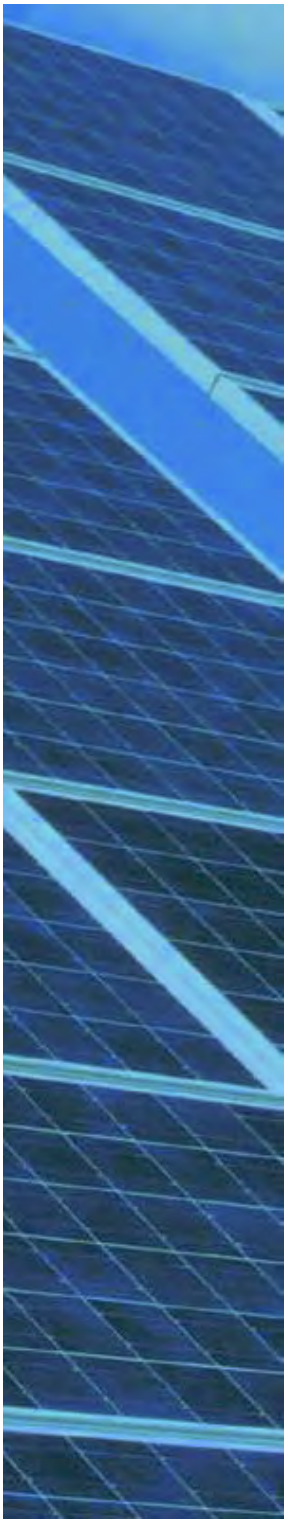
amigos, encuentra las respuestas en la página S-1.

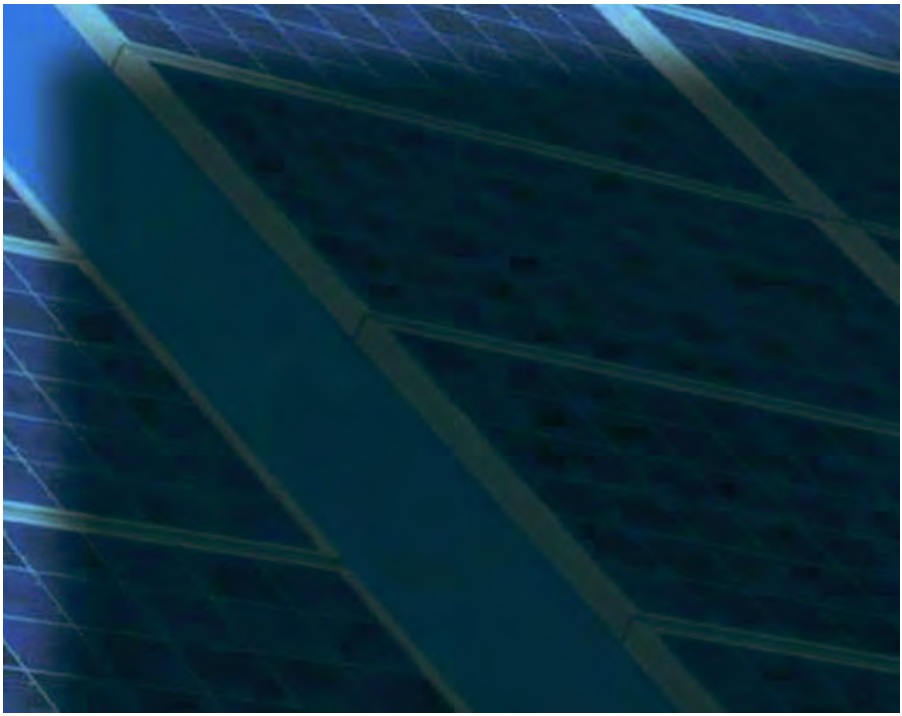
(c) la profundidad del estanque.

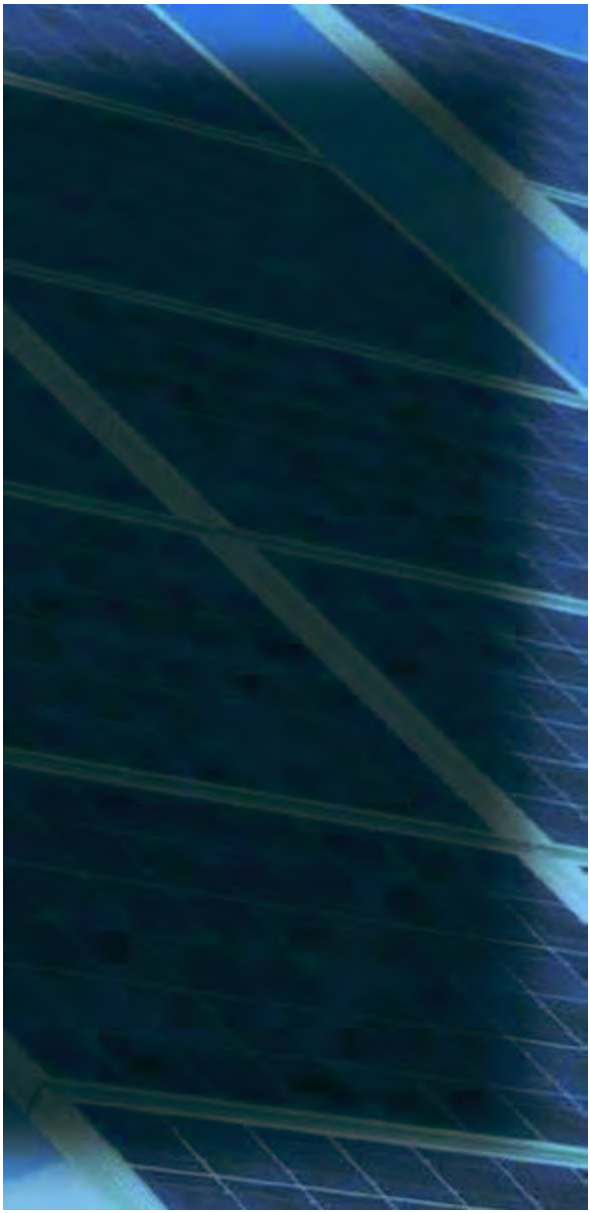
(d) el área superficial del estanque.

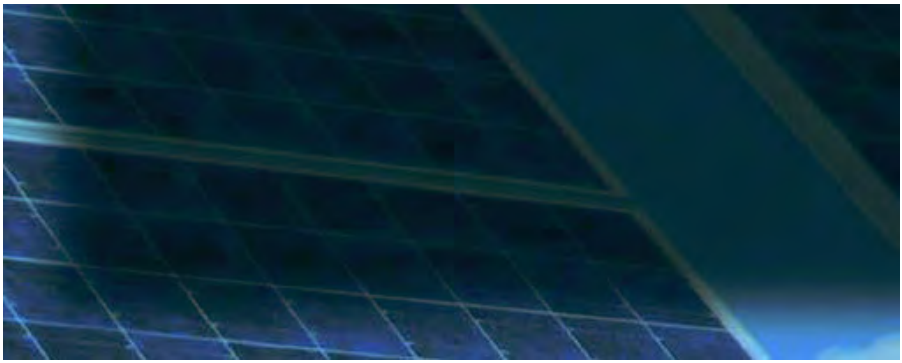












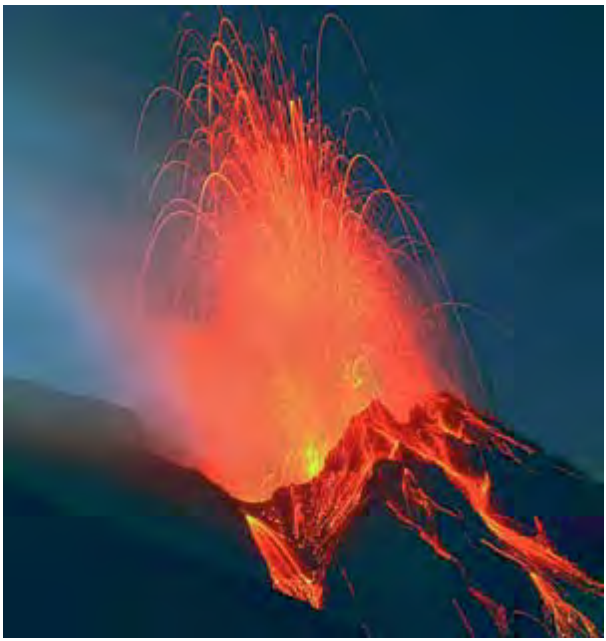
P A R T E T R E S

Calor

Aunque la temperatura de estas chispas

supera los 2,000ºC, el calor que imparten

cuando golpean mi piel es muy pequeño, lo cual ilustra que la temperatura y el calor son conceptos diferentes. Aprender a distinguir entre conceptos muy relacionados es el desafío y la esencia de la Física conceptual.



1 1

C A P Í T U L O 1 5

Tem5

peratura,

calor y ***2***

expansión

15.1 Temperatura

3

15.2 Calor

15.3 Capacidad calorífica específica

15.4 La alta capacidad calorífica específica

del agua

15.5 Expansión térmica

4

5

1 *Los materiales calientes, como la lava y las cenizas que brotan de un volcán, están compuestos de átomos y moléculas que se*

mueven rápidamente. ***2*** *Los Hewitt junto a lava de movimiento*

lento en Hawái. ***3*** *Anette Zetterberg pide a sus alumnos predecir si la bola podrá o no pasar por el orificio cuando el anillo se*

calienta. ***4*** *Un testimonio a Daniel Gabriel Fahrenheit se muestra afuera de su casa (ahora en Gdansk, Polonia).* ***5*** *La estructura hexagonal de un copo de nieve es resultado de los cristales de*

hielo hexagonales que lo constituyen.

C A PÍ T U LO 15 T EM P ER AT U R A , C A LO R Y E X PA NSI Ó N

285

Recuerdo que, cuando niño, siempre que mi fami- época. Rumford quedaba perplejo ante las enormes cantida-lia pasaba por el Massachusetts Institute of Tech-

des de calor producidas en el proceso. La noción de calor en

nology, en Cambridge, a algunas mil as de mi la época, un fluido hipotético llamado calórico, no encajaba hogar en Saugus, el nombre con la evidencia. Con un taladro romo, la cantidad de calor RUMFORD inscrito en lo era mayor. En tanto los cabal os continuaran con su trabajo, alto de uno de los edificios se producía cada vez más calor. La fuente de calor no era algo destacados apuntaba hacia mí.

en el metal, sino el movimiento de los cabal os. Este descu-

Me habían dicho que nuestra

brimiento ocurrió mucho antes de que la fricción se consi-

familia descendía de este gran

derara como una fuerza y antes de que se entendieran los

científico y diplomático.

conceptos de energía y de su conservación. Las mediciones

Rumford, quien original-

cuidadosas de Rumford lo convencieron de la falsedad de la

mente se llamaba Benjamin teoría del calórico del calor. No obstante, la

teoría del calóri-Thompson, nació en Woburn,

co del calor como un fluido se sostuvo durante muchos años.

Massachusetts, en 1753. A la Con el tiempo, los experimentos de Rumford se repitieron y edad de 13 años demostró una

condujeron a la conexión entre calor y trabajo.

habilidad inusual con los

Los logros de Rumford no se limitaron a la ciencia. Por

dispositivos mecánicos y tenía un dominio casi impecable

ejemplo, mientras estuvo en Munich, puso a trabajar a men-

del idioma y la gramática. Pronto asistió a clases de ciencia

digos desempleados en la fabricación de uniformes para el

en la Harvard University. A los 19 años de edad se con-

ejército. También los puso a trabajar en proyectos públicos,

virtió en profesor en Concord (antes llamada Rumford),

uno de los cuales ahora son los famosos Jardines Ingleses.

New Hampshire. Ahí conoció y se casó con una viuda

Una estatua de bronce del conde de Rumford se levanta ahí

rica 14 años mayor. Luego, durante el estallido de la como testimonio de la gratitud de los ciudadanos de Munich.

guerra de independencia de Estados Unidos, se puso de

Los muchos inventos de Rumford lo convirtieron en

parte de los leales a Inglaterra y durante algún tiempo

un hombre rico. En 1796 entregó a la Royal Society de

espió para ellos. Al enfrentar su arresto en 1776 abando-

Gran Bretaña y a la American Academy of Arts and Scien-

nó a su esposa e hija y huyó delante de una turba armada
ces 5,000 dólares a cada una para patrocinar preseas que
con brea caliente y bolsas de plumas. Se dirigió a Boston
se otorgarían cada dos años para la investigación científica
durante la evacuación de las tropas británicas y abordó un
destacada en calor o luz. Con los años, una serie de renom-
barco hacia Inglaterra. Una vez ahí, su carrera científica
brados científicos de Europa y Estados Unidos han recibi-
prosperó. Sus experimentos con pólvora tuvieron tanto
do las preseas, incluidos Michael Faraday, James Maxwel ,
éxito que a los 26 años de edad fue elegido en la pres-
Louis Pasteur y Thomas Edison. El resto de los bienes de
tigiosa Royal Society. Con el tiempo se dirigió a Bava-
Rumford se entregaron a la Harvard University, don de se
ria, donde fue nombrado conde por el príncipe bávaro a
usaron para establecer la actual Cátedra Rumford.
quien le fabricaba cañones. Escogió el nombre de conde
Rumford fue honrado en todo el mundo. En 1805 cortejó
de Rumford en honor a Rumford, New Hampshire.
y se casó con madame Lavoisier, viuda de Antoine Lavoisier.
Para fabricar un cañón, primero se moldea un gran cilin-
Sin embargo, el matrimonio fue breve y pronto se separaron.
dro metálico en una fundición. Luego el cilindro se colo-
Rumford se estableció en París y continuó con su trabajo

ca en un torno, donde se perfora el barril al hacer avanzar

científico, ampliando la larga lista de sus muchos inventos,

un taladro estacionario por el molde. El torno de Rumford

hasta su muerte en 1814.

era impulsado por cabal os, como se acostumbraba en esa

¡Vaya un pariente increíble!

***15.1** Temperatura*

Toda la materia (sólida, líquida y gaseosa) está compuesta de átomos o moléculas en continuo movimiento. Debido a este movimiento azaroso, los átomos y las moléculas de la materia tienen energía cinética. La energía cinética promedio de cada partícula produce un efecto que puedes sentir: calidez. La cantidad que indica la calidez con respecto a algún estándar se llama ***temperatura****. El primer "medidor térmico" para medir temperatura, el termómetro, lo inventó Galileo en 1602 (la palabra térmico viene del término griego que se utiliza para "calor"). El alguna vez familiar termómetro de mercurio en vidrio alcanzó amplia difusión unos 70 años después. (Ahora los termómetros* ***VIDEO: Temperaturas bajas***

de mercurio son obsoletos debido al peligro de envenenamiento con mercurio.) La ***con nitrógeno líquido***

temperatura de alguna cantidad de materia se expresa con un número que corresponde a su grado de calidez o frialdad en alguna escala elegida.

Casi todos los materiales se expanden cuando su temperatura se eleva y se contraen cuando su temperatura disminuye. La mayor parte de los termómetros miden la temperatura mediante la expansión o contracción de un líquido, por lo general mercurio o Tibia

alcohol coloreado, en un tubo de vidrio con escala.

Fría

Caliente

En la escala de temperatura de uso más generalizado, la escala internacional, el número 0 se asigna a la temperatura a la que el agua se congela y el número 100

F I G U R A 1 5 . 1

a la temperatura a la que el agua hierve (a presión atmosférica a nivel del mar). El

¿Puedes confiar en tu sensación de

caliente y frío? ¿Ambos dedos sienten la

espacio intermedio se divide en 100 partes iguales denominadas grados; por tanto, misma temperatura cuando los colocas

un termómetro calibrado de esta forma se llama termómetro centígrado (de centi, en el agua tibia?

"centésima", y gradus, "paso"). Sin embargo, ahora se le llama termómetro Celsius en honor al hombre que sugirió la escala por primera vez, el astrónomo sueco Anders Celsius (1701-1744).

Hay otra escala de temperatura popular en Estados Unidos. En esta escala, el número 32 se asigna a la temperatura a la que se congela el agua, y el número 212 se asigna a la temperatura a la que hierve el agua. Tal escala constituye un termómetro Fahrenheit, en honor a su ilustre inventor, el físico alemán Daniel Gabriel Fahrenheit (1686-1736). La escala Fahrenheit se volverá obsoleta si algún día Estados Unidos F°

C°

adopta el sistema métrico.1

212°

100°

La escala de temperatura preferida por los científicos es la escala Kelvin, llamada 200°

90°

así en honor al físico escocés William Thomson, primer barón Kelvin (1824-1907).

180°

Esta escala está calibrada no en términos de los puntos de congelación y ebullición 80°

del agua, sino en términos de energía en sí. El número 0 se asigna a la temperatura 160°

70°

más baja posible, el ***cero absoluto****, a la cual una sustancia no tiene absolutamente 140°*

60°

ninguna energía cinética que ceder.2 El cero absoluto corresponde a 2273C en la escala Celsius. Las unidades de la escala Kelvin tienen incrementos del mismo ta-120°

50°

maño que los grados de la escala Celsius, de modo que la temperatura de la fusión 100°

40°

del hielo es 273 K. En la escala Kelvin no hay números negativos. Esta escala no se 30°

abordará más sino hasta el estudio de la termodinámica en el Capítulo 18.

80°

Las fórmulas matemáticas que se utilizan para convertir de Fahrenheit a Celsius, y 20°

60°

viceversa, son populares en los exámenes en clase. Tales ejercicios aritméticos en rea-10°

lidad no son física, y la probabilidad de que tengas que hacer esta tarea en algún otro 40°

32°

0°

lado es pequeña, así que no se tratarán aquí. Además, esta conversión

puede calcularse 20°

de una manera muy aproximada con sólo leer las temperaturas correspondientes en las

–10°

escalas que están una al lado de la otra en la Figura 15.2.

0°

–17.8°

La temperatura se relaciona con el movimiento aleatorio de los átomos y las moléculas de una sustancia. (Por concisión, en este capítulo simplemente se dirá moléculas para referirse a átomos y moléculas.) De manera específica, la temperatura es proporcional a la energía cinética "traslacional" promedio del movimiento molecular aleatorio (movimiento que lleva la molécula de un lugar a otro). Las moléculas también pueden ***F I G U R A 1 5 . 2***

girar o vibrar, con energía cinética rotacional o vibratoria asociada, pero dichos movi-Escalas Fahrenheit y Celsius en un

mientos no son de traslación y no definen la temperatura.

termómetro.

1La conversión a Celsius pondría a Estados Unidos en consonancia con el resto del mundo, donde la escala Celsius es el estándar. Pero los estadounidenses son lentos para cambiar. Modificar cualquier costumbre larga-mente establecida es difícil, y la escala Fahrenheit tiene algunas ventajas en el uso cotidiano. Por ejemplo, sus grados son más pequeños (1 F 5 5/9C), lo que ofrece mayor exactitud cuando se reporta el clima en lecturas de temperatura con números enteros. Además, las personas atribuyen de algún modo un significado especial a los números que aumentan en un dígito adicional. Por ende, cuando la temperatura de un día caluroso se informa en 100 F, la idea de calor se transmite de manera más espectacular que si se afirma que la temperatura es 38 C. Como gran parte del sistema británico de medidas, la escala Fahrenheit se amolda al ser humano.

2Incluso en cero absoluto, una sustancia tiene lo que se denomina "energía punto cero", que es la energía no disponible que no puede transferirse a una sustancia diferente. El helio, por ejemplo, tiene suficiente movimiento en cero absoluto como para evitar la congelación. La explicación de esto

tiene que ver con la teoría cuántica.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Verdadero o falso? La temperatura es una medida de la energía cinética total en una sustancia.

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Falso. La temperatura es una medida de la energía cinética traslacional promedio (¡no total!) de las moléculas en una sustancia. Por ejemplo, hay el doble de energía cinética molecular total en 2 L de agua hirviendo que en 1 L, pero las temperaturas de los dos volúmenes de agua son las mismas porque la energía cinética traslacional promedio por molécula es la misma en cada uno.

El efecto de la energía cinética traslacional en comparación con el de la energía ci-

(a) Movimiento

nética rotacional y vibratoria se demuestra de una manera espectacular en un horno de traslacional

microondas. Las microondas que bombardean tu comida hacen que ciertas moléculas de la comida, principalmente las moléculas de agua, se pongan a saltar y oscilen con (b) Movimiento

considerable energía cinética rotacional. Pero las moléculas oscilatorias no cocinan rotacional

la comida. Lo que aumenta la temperatura y cocina la comida, y rápidamente, es la energía cinética traslacional impartida a las moléculas vecinas que brincan de las moléculas de agua oscilatorias. (Para representar esto, imagina un puñado de canicas (c) Movimiento

que se ponen a volar en todas direcciones después de encontrar las aspas giratorias de vibratorio

un ventilador; consulta también la página 418.) Si las moléculas vecinas no interac-cionaran con las moléculas de agua oscilatorias, la temperatura de la comida no sería ***F I G U R A 1 5 . 3***

Las partículas de la materia se mueven

diferente a la de antes de encender el horno de microondas.

de diferentes maneras. Se mueven de

Es interesante que lo que en realidad muestra un termómetro es su propia tempera- un lugar a otro, giran y vibran de ida y tura. Cuando un termómetro está en contacto térmico con algo cuya temperatura se vuelta. Todos estos tipos de movimiento, quiere conocer, la energía fluirá entre los dos hasta que sus temperaturas sean iguales más la energía potencial, contribuyen y se establezca el equilibrio térmico. Si se conoce la temperatura del termómetro, en- a la energía global de una sustancia.

tonces se conoce la temperatura de lo que se está midiendo. Un termómetro debe ser Sin embargo, la temperatura se define suficientemente pequeño para no alterar de manera considerable la temperatura de lo mediante el movimiento traslacional.

que se mide. Si mides la temperatura del aire de una habitación, entonces tu termómetro es suficientemente pequeño. Pero si mides la temperatura de una gota de agua, el contacto entre la gota y el termómetro puede cambiar la temperatura de la gota, un caso clásico del proceso de medición que cambia la cosa que se somete a medición.

15.2 *Calor*

Si tocas una estufa caliente, la energía entra en tu mano porque la estufa está más caliente que tu mano. Sin embargo, cuando tocas un trozo de hielo, la energía se transfiere de tu mano al hielo más frío. La dirección de la transferencia espontánea de energía siempre es de un objeto más caliente a un objeto cercano más frío. La energía transferida de un objeto a otro debido a una diferencia de temperatura entre ellos se llama ***calor****.*

Es importante señalar que la materia no contiene calor. Esto lo descubrió Rumford en sus experimentos de perforación de cañones, como se mencionó antes. Rumford y otros investigadores que le siguieron se dieron cuenta de que la materia contenía energía cinética molecular y posiblemente energía potencial, no calor. El calor es energía en tránsito de un cuerpo de mayor temperatura a uno de menor temperatura. Una vez transferida, la energía deja de ser calor. (A manera de analogía, el trabajo también es energía en tránsito. Un cuerpo no contiene trabajo. Realiza trabajo o se realiza trabajo ***F I G U R A 1 5 . 4***

Hay más energía cinética molecular en

sobre él.) En capítulos anteriores, a la energía resultante del flujo de calor se le llamó el recipiente lleno de agua caliente que energía térmica para dejar claro su vínculo con el calor y la temperatura. En este capí- en la pequeña taza de agua a mayor tulo se usará el término que prefieren los científicos, energía interna.

temperatura.

288

PA R T E T RES

C A LO R

*La **energía interna** es el gran total de todas las energías dentro de una sustancia. Además de la energía cinética traslacional de las moléculas que se empujan en una sustancia, hay energía en otras formas. Hay energía cinética rotacional de las moléculas y energía cinética debida a movimientos internos de los átomos en el interior de las moléculas.*

SCREENCAST: Calor y temperatura

También hay energía potencial debida a las fuerzas entre las moléculas. De modo que una sustancia no contiene calor, contiene energía interna.

Cuando una sustancia absorbe o cede calor, la energía interna de la sustancia aumenta o disminuye. En algunos casos, como cuando se funde el hielo, el calor agregado no aumenta la energía cinética molecular sino que más bien pasa a otras formas de energía. La sustancia experimenta un cambio de fase, lo que se cubrirá con detalle en el Capítulo 17.

Para dos cosas que están en contacto térmico, el flujo de calor es de la sustancia con mayor temperatura a la sustancia con menor temperatura. Esto no necesariamente es un flujo de una sustancia con más energía interna a una sustancia con menos energía Estufa caliente

*interna. Hay más energía interna en un tazón con agua caliente de la que hay en una **F I G U R A 1 5 . 5***

tachuela al rojo vivo; sin embargo, si la tachuela se sumerge en el agua, el calor fluye Aunque a ambos recipientes se les agrega de la tachuela al agua caliente y no de la manera inversa. El calor nunca fluye por sí la misma cantidad de calor, la tempera-solo de una sustancia con menor

temperatura a una sustancia con mayor temperatura.

tura aumenta más en el recipiente con la

Cuánto calor fluye depende no sólo de la diferencia de temperatura entre las sustan-menor cantidad de agua.

cias, sino también de la cantidad de material. Por ejemplo, un barril de agua caliente transferirá más calor hacia una sustancia más fría que el que transferirá una taza de agua caliente. Hay más energía interna en el volumen más grande de agua.

F I G U R A 1 5 . 6

Así como el agua en los dos brazos del tubo en U busca

un nivel común (donde las presiones a una profundidad

dada sean iguales), el termómetro y su entorno inmediato

buscan una temperatura común (en la que la EC molecu-

lar promedio sea la misma para ambos).

P U N T O D E C O N T R O L

1. *Supón que aplicas una flama a 1 L de agua durante cierto tiempo y su temperatura se eleva 28C. Si aplicas la misma flama durante el mismo*

tiempo a 2 L de agua, ¿en cuánto aumentará su temperatura?

2. *Si una canica rápida golpea una dispersión aleatoria de canicas lentas, ¿la canica rápida por lo general acelera o frena? Entre la canica que inicialmente se movía rápido y las canicas inicialmente lentas, ¿cuál(es) pierde(n) energía cinética y cuál(es) gana(n) energía cinética? ¿Cómo se relacionan estas preguntas con la dirección del flujo de calor?*

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Su temperatura aumentará sólo en 18C porque hay el doble de moléculas en 2 L de agua y cada molécula recibe sólo la mitad de energía en promedio.*

Así como la oscuridad es la ausen-

2. *Una canica que se mueve rápidamente frena cuando golpea canicas que se cia de luz, el frío es la ausencia de*

mueven en forma lenta. Transfiere parte de su energía cinética a las canicas más energía interna.

lentas. Lo mismo sucede con el flujo de calor. Las moléculas con más energía cinética que están en contacto con moléculas que tienen menos energía cinética transfieren parte de su energía en exceso a las menos energéticas. La dirección de transferencia de energía es de caliente a frío. Sin embargo, tanto para las canicas como para las moléculas, la energía total antes y después del contacto es la misma.

Medición del calor

Entonces, el calor es el flujo de energía desde una cosa hacia otra debido a una diferencia de temperatura. Dado que la energía térmica está en tránsito, se mide en joules. En Estados Unidos, una unidad de calor más común es la caloría. La caloría se define como la cantidad La temperatura se mide en grados;

de calor necesaria para cambiar la temperatura de 1 gramo de agua en 1 grado Celsius.3

el calor se mide en joules.

Para determinar las clasificaciones energéticas de los alimentos y los combustibles, se queman y se mide la energía liberada. (Tu cuerpo "quema" alimentos a un ritmo lento.) La unidad de calor usada para etiquetar los alimentos en realidad es la kilocaloría, que son 1,000 calorías (el calor indispensable para elevar la temperatura de 1 kilogramo de agua

en 1C). Para distinguir esta unidad de la caloría más pequeña, la unidad alimenticia en ocasiones se denomina Caloría (con C mayúscula). Es importante recordar que la caloría y la Caloría son unidades de energía. Estos nombres son portadores históricos de la idea temprana de que el calor es un fluido invisible llamado calórico. Esta opinión persistió hasta el siglo XIX, incluso después de que los experimentos de Rumford mostraron lo contrario.

Ahora se sabe que el calor es una forma de transferencia de energía, no una sustancia aparte, de modo que no necesita su propia unidad independiente. Algún día la caloría puede ceder su lugar al joule, una unidad del SI, como la unidad común para medir calor. (La relación entre calorías y joules es que 1 caloría 4.19 joules.) En este libro aprenderás acerca del calor con la caloría conceptualmente más simple; pero, en el laboratorio, puedes usar el equivalente joule, donde una entrada de 4.19 joules aumenta la temperatura de 1 gramo de agua en 18C.

F I G U R A 1 5 . 7

Para quien cuida su peso, el cacahuate

contiene 10 Calorías; para el físico, libe-

P U N T O D E C O N T R O L

ra 10,000 calorías (o 41,900 joules) de

Una tachuela de hierro y un gran tornillo de hierro se retiran de un horno *energía cuando se quema o consume.*

caliente. Ambos están al rojo vivo y tienen la misma temperatura. Cuando se sueltan en idénticos recipientes con agua de igual temperatura, ¿cuál eleva más la temperatura del agua?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Tanto el calor como el trabajo son

El tornillo grande de hierro tiene más energía interna para impartir al agua y calen-

“energía en movimiento”: energía

tarla más que la tachuela. Aunque ambos objetos tienen la misma temperatura ini-que se transfiere de una sustancia

cial (la misma energía cinética promedio por molécula), el tornillo más

masivo tiene a otra. Ambas se miden en unidades de energía, por lo general en

más moléculas y, por tanto, más energía total: energía interna. Este ejemplo recalca joules.

la diferencia entre temperatura y energía interna.

***15.3** Capacidad calorífica específica*

Probablemente has notado que algunos alimentos permanecen más calientes durante más tiempo que otros. Si sacas una tostada de un tostador y viertes sopa caliente en un tazón al mismo tiempo, pocos minutos después la sopa todavía está agradablemente ti -

bia, en tanto que la tostada se habrá enfriado mucho. De igual modo, si esperas poco tiempo antes de comer una rebanada de roast beef caliente y una cucharada de puré de papas, ambas inicialmente a la misma temperatura, descubrirás que la carne se ha enfriado más que las papas.

Diferentes sustancias tienen distintas capacidades para almacenar energía interna.

Si calientas una cazuela con agua en una estufa, puedes descubrir que se necesi - ***FIGURA 15.8***

tan 15 minutos para que aumente de temperatura ambiente a temperatura de ebu- El relleno de la tarta de manzana calien-llición. Pero si pones una masa igual de hierro sobre la misma flama, descubrirías te puede estar demasiado caliente para que pasará por el mismo rango de temperatura en apenas unos dos minutos. Para la comerlo aun cuando la base de pan no plata, el tiempo sería de menos de un minuto.

lo esté.

3Una unidad de calor menos común es la unidad térmica británica (BTU). La BTU se define como la cantidad de calor necesaria para cambiar la temperatura de 1 lb de agua en 1 grado Fahrenheit. Una BTU es igual a 1,054 J.

290

PA R T E T RES

C A LO R

Diferentes materiales necesitan distintas cantidades de calor para aumentar la temperatura de una masa dada del material un número específico de grados. Esto se debe en parte a que diferentes materiales absorben la energía de distintas formas. La energía puede dispersarse entre varios tipos de energía, incluida rotación molecular y energía potencial, que
SCREENCAST: Calor especifico

aumentan menos la temperatura. Excepto por casos especiales como el gas helio, la energía siempre se comparte entre diferentes tipos de movimiento, pero en grados variables.

Mientras que 1 gramo de agua necesita 1 caloría de energía para aumentar su temperatura en 1 grado Celsius, se necesita aproximadamente sólo un octavo de esa energía para aumentar la temperatura de un gramo de hierro en la misma cantidad. El agua absorbe más calor por gramo que el hierro para el mismo cambio de temperatura. Se dice que el agua tiene una ***capacidad calorífica específica*** *más alta (en ocasiones simplemente llamada calor específico).*

La capacidad calorífica específica de cualquier sustancia se define como la cantidad de calor necesaria para cambiar la temperatura de una unidad de masa de la sustancia en 1 grado Celsius.

Si agregas 1 caloría de calor a

Si se conoce la capacidad calorífica específica c, entonces la cantidad de calor Q

1 gramo de agua, aumentarás su

transferida cuando una masa m de una sustancia experimenta un cambio de tempera-temperatura en 18C.

tura Δ T es capacidad calorífica específica 3 masa 3 cambio de temperatura. En forma de ecuación, Q 5 cm T.

Se puede pensar en la capacidad calorífica específica como en inercia térmica. Recuerda que inercia es un término usado en mecánica para denotar la resistencia de un objeto a cambiar en su estado de movimiento. La capacidad calorífica específica es una especie de inercia térmica porque denota la resistencia de una sustancia a cambiar su temperatura.

***15.4** La alta capacidad calorífica específica del agua*

El agua tiene una capacidad mucho más alta para almacenar energía que la mayor parte de los materiales, salvo algunos un tanto inusuales. Una cantidad relativamente pequeña de agua absorbe una gran cantidad de calor por un pequeño aumento de temperatura correspondiente. Debido a esto, el agua es un refrigerante muy útil en los 25°C

20°C

sistemas de enfriamiento de automóviles y otros motores. Si en los sistemas de enfriamiento se usara un líquido de menor capacidad calorífica específica, su temperatura se ***F I G U R A 1 5 . 9***

elevaría más por una absorción similar de calor.

Dado que el agua tiene una alta capaci-

El agua también tarda más tiempo en enfriarse, un hecho que explica por qué, en dad calorífica específica y es transparen-épocas antiguas, las personas usaban botel as de agua caliente durante las frías noches de te, se necesita más energía para calentar

invierno. En la actualidad, en muchos lugares, las han sustituido con cobertores eléctricos.

el agua que para calentar la tierra. La

Esta tendencia del agua a resistir los cambios de temperatura mejora el clima en muchos energía solar incidente sobre la tierra se

lugares. La siguiente vez que mires un globo terráqueo, observa la gran latitud de Europa.

concentra en la superficie, pero como la

Si el agua no tuviera una alta capacidad calorífica específica, los países de Europa serían luz solar sobre el agua se extiende bajo la

superficie, entonces se "diluye".

tan fríos como las regiones del noreste de Canadá, pues tanto Europa como Canadá reciben aproximadamente la misma cantidad de luz solar por kilómetro cuadrado. La corriente atlántica conocida como Corriente del Golfo lleva agua caliente al noreste desde el Caribe. Conserva mucha de su energía interna el tiempo suficiente para llegar al Atlántico norte en la costa de Europa, donde se enfría. La energía liberada, cerca de 1 caloría por grado por cada gramo de agua que se enfría, se transfiere al aire, donde la transportan los vientos del oeste sobre el Continente Europeo.

Un efecto similar ocurre en Estados Unidos. Los vientos en las latitudes de América del Norte son del oeste. En la costa oeste, el aire se mueve del Océano Pacífico a tierra. Debido a la alta capacidad calorífica específica del agua, un océano no varía mucho en temperatura El clima tiene que ver con el com-de verano a invierno. El agua es más cálida que el aire en el invierno y más fría que el aire portamiento promedio, en tanto

en el verano. En invierno, el agua calienta el aire que se mueve sobre el a y el aire calienta que el tiempo tiene que ver con

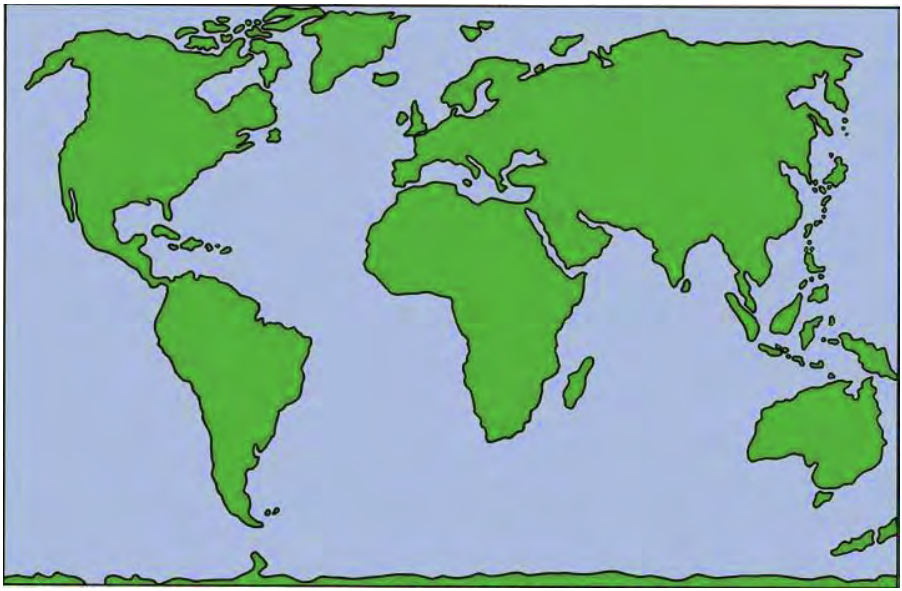
las regiones costeras de América del Norte. En verano, el agua enfría el aire y las regiones las fluctuaciones. El clima es lo que

costeras se enfrían. En la costa este, el aire se mueve desde tierra hacia el Océano Atlántico.

se espera y el tiempo es lo que se

obtiene.

La tierra, con una capacidad calorífica específica más baja, se calienta en verano pero se enfría con rapidez en el invierno. Como resultado de la alta capacidad calorífica específica



Del mismo modo como en el lado

exterior de la plataforma de un

América

del Norte

Europa

Asia

tiovivo siempre se viajará más

rápido, las personas que viven más

cerca del ecuador recorren más

distancia en un día, y en consecuen-

cia se mueven más rápido, que las

África

personas que viven más alejadas del

Ecuador

ecuador. Cuando los objetos que no

están fijos al suelo (como el aire, el

América

agua, los aviones y los misiles balís-

del Sur

ticos) se mueven hacia el ecuador,

no pueden seguir el ritmo de la

Australia

tierra bajo ellos que se mueve cada

vez más rápido. Dado que la Tierra

gira hacia el este, estos objetos en

movimiento libre quedan rezaga-

dos, lo que les da una desviación

hacia el oeste. Por el contrario,

un objeto con movimiento libre

FIGURA 15.10

que se aleja del ecuador se desvía

Muchas corrientes oceánicas, mostradas en azul, distribuyen el calor de las regiones ecuatoriales hacia el este porque conserva su

más cálidas a las regiones polares más frías.

mayor rapidez dirigida hacia el

este. Éste es el efecto Coriolis. Así

del agua y las direcciones de los vientos, la ciudad de San Francisco, en la costa oeste, es más que las corrientes oceánicas que se

caliente en invierno y más fría en verano que la ciudad de Washington, D.C., en la costa dirigen hacia el ecuador tienden a

este, que está aproximadamente a la misma latitud.

desviarse hacia el oeste, en tanto

que las corrientes que se alejan del

Las islas y penínsulas que están más o menos rodeadas de agua no tienen los mis-ecuador se desvían hacia el este.

mos extremos de temperaturas que se observan en el interior de un continente. Cuan-Es por eso que las corrientes del

do el aire es caliente en los meses de verano, el agua lo enfría. Cuando el aire es frío hemisferio norte tienden a circular

en los meses de invierno, el agua lo calienta. El agua modera los extremos de tempe-en el sentido de las manecillas del

ratura. Las temperaturas veraniegas altas e invernales bajas comunes en Manitoba y reloj, en tanto que las corrientes del

las Dakotas, por ejemplo, se deben principalmente a la ausencia de grandes cuerpos de hemisferio sur tienden a circular en

agua. Los europeos, los isleños y las personas que viven cerca de las corrientes de aire sentido contrario a las manecillas

del reloj, como se ilustra claramente

oceánicas deben estar agradecidos de que el agua tenga tan alta capacidad

calorífica en la Figura 15.10.

específica. ¡Los habitantes de San Francisco lo están!

P U N T O D E C O N T R O L

¿Cuál tiene mayor capacidad calorífica específica: el agua o la arena?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

El agua tiene una capacidad calorífica específica más alta. El agua tiene mayor inercia térmica y tarda más tiempo en calentarse a la luz caliente del sol y más tiempo en enfriarse en una noche fría. La arena tiene una baja capacidad calorífica, como lo demuestra lo rápido que se calienta la superficie en la luz solar matutina y lo rápido que se enfría en la noche. (Caminar o correr descalzo por la arena ardiente en el día es una experiencia mucho muy diferente que caminar en la arena fría de la tarde.) ***F I G U R A 1 5 . 1 1***

La temperatura de las chispas es muy

alta, de aproximadamente 2,000°C.

15.5 *Expansión térmica*

Ésa es mucha energía por molécula de

chispa. Sin embargo, debido a las pocas

Cuando la temperatura de una sustancia aumenta, sus moléculas o átomos se empujan moléculas por chispa, la energía interna más rápido y se separan más, en promedio. El resultado es una expansión de la sustancia. es pequeña y no plantea ningún riesgo.

Con pocas excepciones, todas las formas de materia (sólidos, líquidos, gases y plasmas) La temperatura es una cosa; la transfe-por lo general se expanden cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían.

rencia de energía es otra.

292

PA R T E T RES

C A LO R

En la mayor parte de los casos que involucran sólidos, dichos cambios de volumen no son muy apreciables, pero con una observación cuidadosa generalmente se detectan. Los cables de teléfono se vuelven más largos y se pandean más en un día caluroso de verano que en un día frío de invierno. La tapa metálica de un frasco de vidrio con frecuencia puede aflojarse si se calienta bajo el agua caliente. Si una parte de un pedazo de vidrio se calienta o se enfría más rápidamente que las partes contiguas, la expansión o contracción resultante pueden romper el vidrio, en especial si el vidrio es grueso. Los utensilios de vidrio Pyrex®

resistentes al calor son una excepción porque están especialmente formulados para expandirse muy poco con el incremento de temperatura (cerca de un tercio del vidrio ordinario).

La expansión de las sustancias debe considerarse en estructuras y dispositivos de todo tipo. Un dentista utiliza material de relleno que tiene la misma tasa de expansión que los dientes. Los pistones de aluminio de algunos motores automotrices son apenas un poco menores en diámetro que los cilindros de acero para permitir la tasa mucho mayor de expansión del aluminio. Los ingenieros civiles utilizan acero reforzado que ***F I G U R A 1 5 . 1 2***

tiene la misma tasa de expansión del concreto. Los largos puentes de acero por lo ge-Un extremo del puente está fijo, en

neral tienen un extremo fijo en tanto que el otro extremo descansa sobre balancines tanto que el extremo que se muestra se

(Figura 15.12). El puente Golden Gate de San Francisco se contrae más de un metro apoya en balancines que permiten la

en clima frío. La carretera está segmentada con brechas del tipo ranura y lengüeta expansión térmica.

llamadas juntas de expansión (Figura 15.13). De igual modo, las calzadas y aceras de concreto están cortadas por brechas, en ocasiones llenas con chapopote, de modo que el concreto pueda expandirse libremente en verano y contraerse en invierno.

F I G U R A 1 5 . 1 3

Esta brecha en el camino de un

puente se denomina junta de

SCREENCAST: Expansión térmica

expansión; permite la expansión

y contracción del puente.

Antes, las vías de ferrocarril se tendían en segmentos de 39 pies conectadas mediante bridas, con brechas para expansión térmica. En los meses de verano, las vías se expandían y las brechas eran estrechas. En invierno, las brechas se ensanchaban, lo que ocasionaba un traqueteo más pronunciado cuando los trenes rodaban a lo largo de las vías. En la actualidad no se escucha el traqueteo porque alguien tuvo la brillante idea de eliminar las brechas y soldar las vías. ¿Acaso la expansión en el calor del verano no hace que las vías soldadas se pandeen, como muestra la Figura 15.14? No, ¡si éstas se tienden y sueldan en los días más calurosos del verano! El encogimiento de las vías los días fríos ***F I G U R A 1 5 . 1 4***

de invierno estira las vías, lo que no causa pandeo. Las vías estiradas están bien.

Expansión térmica. El calor extremo de

Diferentes sustancias se expanden a distintas tasas. Cuando dos tiras de diferentes un día de julio causó el pandeo de estas

metales (por decir, una de latón y la otra de hierro) se sueldan o remachan juntas, la vías de ferrocarril.

mayor expansión de un metal resulta en el doblado de la tira, como se muestra en la Figura 15.15. A esta delgada barra compuesta se le denomina tira bimetálica. Cuando la tira se calienta, un lado de la tira doble se hace más largo que el otro, lo que ocasiona que la tira se doble en una curva. Por el contrario, cuando la tira se enfría, tiende a doblarse en la dirección opuesta, porque el metal que se expande más también se encoge más. El movimiento de la tira puede servir para mover un puntero, regular ***SCREENCAST: Cómo funciona***

una válvula o cerrar un interruptor. Las tiras bimetálicas se utilizan en termómetros ***un termostato***

de horno, tostadores eléctricos y varios dispositivos.

F I G U R A 1 5 . 1 5

Temperatura ambiente

Latón

Hielo Latón

Una tira bimetálica. El latón se expande

más cuando se calienta que el hierro y

Hierro

Hierro

se contrae más cuando se enfría. Debido

a este comportamiento, la tira se dobla

como se muestra.

Una aplicación práctica de las diferentes tasas de expansión es el termostato (Figura 15.16). El doblado atrás y adelante de la bobina bimetálica abre y cierra un circuito Hacia el horno

eléctrico. Cuando la habitación se enfría mucho, la bobina se dobla hacia

el lado del latón, lo que activa un interruptor eléctrico que enciende la calefacción. Cuando la habitación se calienta mucho, la bobina se dobla hacia el lado del hierro, lo que activa un interruptor eléctrico que apaga la unidad calefactora. Los refrigeradores están equipados con termostatos que impiden que se calienten o se enfríen mucho.

Los líquidos se expanden mucho con el aumento de temperatura. En muchos casos, la expansión de los líquidos es mayor que la expansión de los sólidos. La gasolina que se desborda del tanque de un automóvil en un día caliente es una prueba de esto. Si el tanque y los contenidos se expandieran a la misma tasa, se expandirían juntos y no habría desbordamiento. De igual modo, si la expansión del vidrio de un termómetro fuese tan grande ***F I G U R A 1 5 .1 6***

Un termostato pre-electrónico. Cuando

como la expansión del mercurio, el mercurio no se elevaría con el aumento de tempera- la bobina bimetálica se expande, la tura. La razón por la que el mercurio de un termómetro se eleva con el aumento de tem- gota de mercurio líquido se aleja de los peratura es que la expansión del mercurio líquido es mayor que la expansión del vidrio.

contactos eléctricos y rompe el circuito

eléctrico. Cuando la bobina se contrae,

el mercurio rueda contra los contactos y

completa el circuito.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Por qué es aconsejable dejar que las líneas telefónicas se pandeen cuando se tienden entre postes en verano?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Las líneas telefónicas son más largas en verano, cuando están más calientes, y más cortas en invierno, cuando están más frías. En consecuencia, se pandean más en los días calurosos de verano que en invierno. Si las líneas telefónicas no se tienden con suficiente pandeo en verano, pueden contraerse demasiado y romperse durante el invierno.

Expansión del agua

El agua, como la mayoría de las demás sustancias, se expande cuando se

calienta. Pero, es ***F I G U R A 1 5 .17***

interesante que no se expanda en el rango de temperatura entre 0C y 4C. En este rango Coloca una bola de ping-pong abollada sucede algo fascinante. El hielo tiene una estructura cristalina, con cristales de estructura en agua hirviendo y eliminarás la abolladura. ¿Por qué?

abierta. Las moléculas de agua de esta estructura abierta ocupan un mayor volumen que en la fase líquida (Figura 15.18). Esto significa que el hielo es menos denso que el agua.

Los copos de nieve se forman

principalmente de vapor de agua

más que de agua líquida. Los

copos de nieve verdaderamente

simétricos son la excepción, en vez

de la regla. Muchos mecanismos

interrumpen el crecimiento perfec-

to de los copos de nieve. En 1611,

el astrónomo Kepler escribió un

Agua líquida

Hielo

artículo sobre los copos de nieve

(densa)

(menos denso)

de seis puntas. Cincuenta y cuatro

años después, el físico Roberto

F I G U R A 1 5 . 1 8

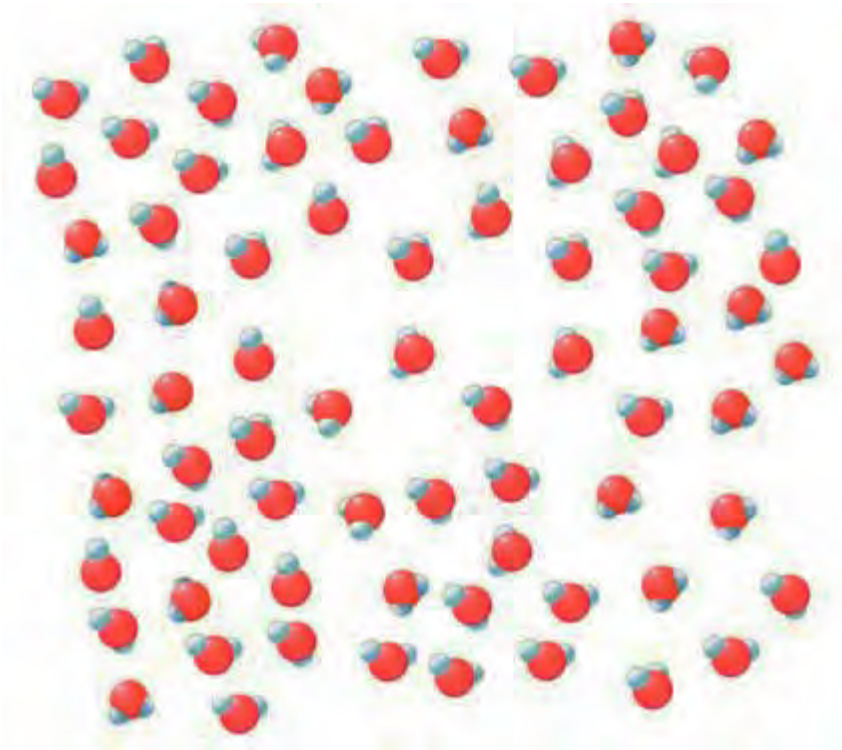
Hooke utilizó su primer microsco-

El agua líquida es más densa que el hielo porque las moléculas de agua de

un líquido están más jun-pio para dibujar las formas de los

tas que las moléculas de agua congeladas del hielo, donde tienen una estructura cristalina abierta.

copos de nieve.



P U N T O D E C O N T R O L

¿Qué hay dentro de los espacios abiertos de los cristales de agua que se muestran en las Figuras 15.18 y 15.19? ¿Es aire, vapor de agua o nada?

SCREENCAST: Expansión térmica

del agua

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

En los espacios abiertos no hay absolutamente nada. Es espacio vacío. Si hubiera aire o vapor en los espacios abiertos, la ilustración debería mostrar moléculas ahí: oxígeno y nitrógeno para el aire y H O para el vapor de agua.

2

F I G U R A 1 5 . 1 9

Cristales de hielo en agua

La estructura abierta de los cristales de

líquida casi congelada

hielo tridimensionales que se forman a

medida que el agua se congela crea un

aguanieve microscópica que aumenta un

poco el volumen del agua.

Cuando el hielo se funde, no todos los cristales de estructura abierta colapsan. Algunos cristales microscópicos permanecen en la mezcla hielo-agua, lo que constituye

¿Cómo es que la sal de roca espar-

un aguanieve que "hincha" un poco el agua y aumenta su volumen ligeramente (Fi-cida sobre los caminos helados en

gura 15.19). Esto da por resultado agua de hielo que es menos densa que el agua y un invierno ayuda a fundir el hielo?

poco más caliente. A medida que la temperatura del agua a 0C aumenta, más de los Resulta que la sal en agua se sepa-cristales de hielo restantes colapsan. Cuando dichos cristales se funden, disminuye aún ra en iones de sodio y cloro que,

más el volumen del agua. El agua experimenta dos procesos al mismo tiempo: expan-cuando se unen a las moléculas de

sión y contracción (Figura 15.20). El volumen tiende a aumentar debido al mayor mo-agua, ceden energía que funde

las partes microscópicas de una

vimiento molecular con el aumento de temperatura, mientras que el volumen a cerca superficie helada. La presión de

de 0C disminuye a medida que los cristales de hielo colapsan al fundirse. El efecto de los automóviles que ruedan sobre

colapso domina hasta que la temperatura alcanza 4C. Después de esto, la expansión la superficie helada cubierta de sal

supera a la contracción porque la mayor parte de los cristales de hielo microscópicos se hace que la sal penetre en el hielo,

fundieron para entonces (Figura 15.21).

lo que intensifica el proceso de

Cuando el agua de hielo se congela y se convierte en hielo sólido, su volumen au-fusión. La única diferencia entre la

menta en casi 10% y su densidad se reduce. Es por esto por lo que el hielo flota en el sal de roca y la sal que rocías sobre

las rosetas de maíz es el tamaño

agua. Como la mayoría de las demás sustancias, el hielo sólido se contrae con un mayor de los cristales.

enfriamiento. Este comportamiento del agua es muy importante en la naturaleza. Si el agua fuese más densa a 0C, se asentaría en el fondo de un estanque o lago. Sin embargo, el agua a 0C, es menos densa y "flota" en la superficie. Qué bueno que el hielo se forma en la superficie.

F I G U R A 1 5 . 2 0

La curva azul indica la expansión

normal del agua con el aumento de

temperatura. La curva verde indica la

contracción de los cristales de hielo en

VOLUMEN

agua de hielo a medida que se funden

con el aumento de temperatura. La

curva roja muestra el resultado de ambos

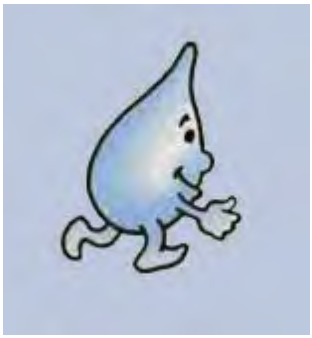
0˚C

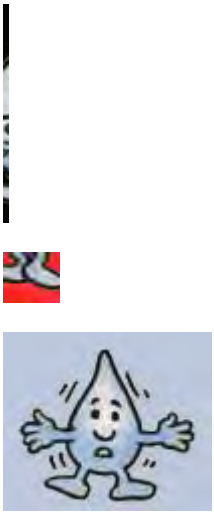
TEMPERATURA

0˚C

0˚C 4˚C

procesos.





F I G U R A 1 5 . 2 1

Entre 0 y 4C, el volumen del agua

1.09

Hielo

Vapor

líquida disminuye a medida que aumen-

1.08

ta la temperatura. Arriba de 4C, el agua

1.07

de agua

1.06

se comporta de la forma en que lo hacen

1.05

Agua líquida

otras sustancias: su volumen se incre-

1.04

menta cuando su temperatura aumenta.

Volumen (mL) 1.03

1.02

Los volúmenes mostrados aquí son para

1.01

una muestra de 1 gramo.

1.00

0

100

1.0016

Temperatura (°C)

1.0014

1 El agua líquida abajo

de 4°C se hincha con

1.0012

cristales de hielo.

3

1.0010

2 Al calentarse, los

cristales colapsan, lo

que da por resultado

1.0008

un menor volumen

1

para el agua líquida.

1.0006

Volumen (mL)

3 Arriba de 4

2

°C, el agua

1.0004

líquida se expande a

medida que se calienta

1.0002

por un mayor

movimiento molecular.

1.0000

0

4

8

12

16

18

Temperatura (˚C)

VIDA EN LOS EXTREMOS

Algunos desiertos, como los de las planicies de España, De los desiertos a los glaciares, una el Sahara en África y el Gobi en Asia Central, alcanzan

variedad de criaturas han inventado

temperaturas superficiales de 60C (140F). ¿Demasiado

formas de sobrevivir en los rincones

caliente para la vida? No para ciertas especies de hormigas del género más hostiles del mundo. Una especie de

Cataglyphis, que proliferan a esta temperatura abrasadora. A esta gusano prolifera en el hielo glacial del

temperatura extremadamente alta, las hormigas del desierto pueden

Ártico. Hay insectos en el hielo antártico

forrajear alimentos sin el peligro de la presencia de lagartijas, que que bombean en todo su cuerpo

de otro modo las capturarían. Resistentes al calor, dichas hormigas

anticongelante para evitar convertirse

pueden soportar temperaturas más altas que cualquier otra criatura

en hielo sólido. Algunos peces que viven

en el desierto (excepto los microbios). Es tema actual de investigación bajo el hielo pueden hacer lo mismo.

cómo pueden hacer esto. Hurgan en la superficie del desierto en

También hay bacterias que proliferan en

busca de los cadáveres de aquellas criaturas que no encontraron

manantiales de agua hirviendo gracias a

refugio a tiempo y tocan la arena caliente lo menos posible al tiempo que tienen proteínas resistentes al calor.

que corren rápidamente pequeños tramos en cuatro patas y dos las

Si se comprende la manera como

mantienen en el aire. Aunque sus rutas de forrajeo son en zigzag

algunas criaturas sobreviven en los extremos de temperatura, se

sobre el suelo del desierto, sus rutas de regreso casi siempre son líneas
pueden tener indicios de cómo encontrar soluciones prácticas a los

rectas a sus nidos. Logran rapideces de 100 cuerpos de largo por

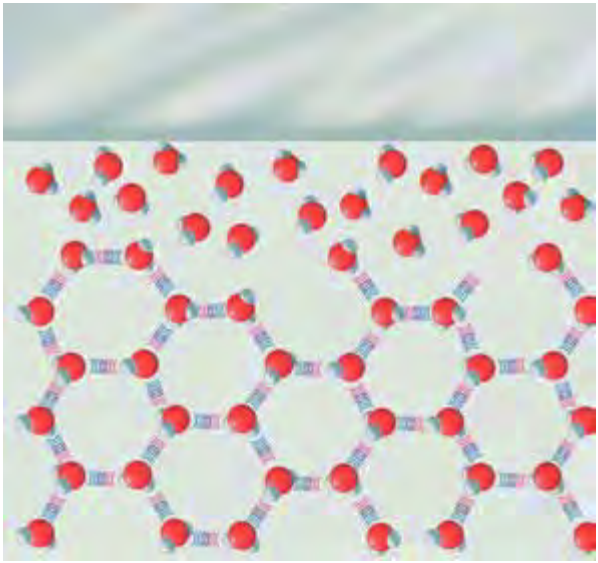
problemas físicos que enfrenta el ser humano. Los astronautas que

segundo. Durante una vida promedio de seis días, la mayoría de estas

se aventuren lejos de la Tierra, por ejemplo, necesitarán todas las

hormigas recupera de 15 a 20 veces su peso en alimentos.

técnicas disponibles para hacer frente a ambientes desconocidos.



F I G U R A 1 5 . 2 2

El hielo es resbaloso porque su estructura cristalina no se mantiene con

facilidad en la superficie.

navaja del patín

Delgada

película de

agua líquida

Hielo

De modo que un estanque se congela de la superficie hacia abajo. En un invierno frío, el hielo será más grueso que en un invierno más moderado. La temperatura del agua en el fondo de un estanque cubierto de hielo es de 4C, lo que es relativamente cálido para los organismos que viven ahí. Es interesante que los estanques y lagos muy profundos por lo general no estén cubiertos de hielo ni siquiera en los inviernos más fríos. Esto se debe a que toda el agua debe enfriarse a 4C antes de poder alcanzar temperaturas más bajas. En el caso del agua profunda, el invierno no es lo suficientemente prolongado como para reducir todo un estanque a 4C. Toda el agua que está a 4C se encuentra en el fondo. Debido a la alta capacidad calorífica específica del agua y a su mala capacidad de conducir el calor, el fondo de un cuerpo de agua profundo en una región fría permanece a unos 4C constantes todo el año. Los peces deben estar agradecidos de que esto sea así.

F I G U R A 1 5 . 2 3

–10°C

A medida que el agua se enfría en

Hielo

la superficie, se hunde hasta que la

temperatura de todo el lago es de 4C.

0°C

Sólo entonces el agua superficial puede

enfriarse a 0C sin hundirse. Una vez

formado el hielo, las temperaturas abajo

de 4C pueden extenderse hacia abajo

del lago.

4°C

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Cuál fue la temperatura precisa del fondo del lago Michigan, donde el agua es profunda y los inviernos largos, la noche de año nuevo de 1901?

2. ¿Por qué a los peces les conviene que el agua sea más densa a 48C?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A S

1. *4C, porque la temperatura del fondo de cualquier cuerpo de agua que contenga cualquier agua a 4C tiene una temperatura en el fondo de 4C, por la misma razón que las rocas están en el fondo. Las rocas son más densas que el agua y el agua a 4C es más densa que el agua a cualquiera otra temperatura. Así que tanto rocas como agua a 4C se hunden hasta el fondo. El agua también es un mal conductor del calor, de modo que si el cuerpo de agua es profundo y está en una región de inviernos largos y veranos cortos, es probable que el agua del fondo permanezca a 4C constantes todo el año.*

2. *Dado que el agua es más densa a 4C, el agua más fría se eleva y congela sobre la superficie, ¡lo que significa que los peces permanecen en relativo calor!*

C A PÍ T U LO 15 R E V ISI Ó N

297

R E S U M E N D E T É R M I N O S *(C O N O C I M I E N T O)*
Temperatura. *Una medida de la energía cinética traslacional*

Energía interna. *El total de todas las energías moleculares, promedio por molécula en una sustancia, medida en grados*

cinética más potencial, que son internas a una sustancia.

Celsius o Fahrenheit o Kelvins (K).

Capacidad calorífica específica. *Cantidad de calor por*

Cero absoluto. *La temperatura más baja posible que puede*

unidad de masa necesaria para aumentar la temperatura de

tener una sustancia: la temperatura a la cual las moléculas de

una sustancia en 1 grado Celsius.

la sustancia tienen su mínima energía cinética.

Calor. *La energía que fluye de una sustancia de mayor*

temperatura a una sustancia de menor temperatura y que

suele medirse en calorías o en joules.

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S *(C O M P R E N S I Ó N)*

15.1 Temperatura

15.4 La alta capacidad calorífica específica del agua

1. ¿Cuáles son las temperaturas para la congelación del agua en

18. ¿Cómo se compara la capacidad calorífica específica del

las escalas Celsius y Fahrenheit? ¿Para el agua en ebul ición?

agua con las capacidades caloríficas específicas de otros

2. ¿Cuáles son las temperaturas para la congelación del agua y

materiales comunes?

la ebullición del agua en la escala de temperatura Kelvin?

19. El noreste de Canadá y gran parte de Europa reciben

3. ¿Qué se entiende por energía cinética “traslacional”?

aproximadamente la misma cantidad de luz solar por

4. ¿Cuál forma de energía determina la temperatura:

unidad de área. ¿Por qué, entonces, generalmente Europa

la energía cinética traslacional, la energía cinética

es más cálida en el invierno?

rotacional, la energía cinética vibratoria o todas ellas?

20. De acuerdo con la ley de conservación de la energía, si el

5. ¿Bajo qué condiciones puede decirse que "un termómetro

agua de los océanos se enfría, algo más debe calentarse.

mide su propia temperatura"?

¿Qué es lo que se calienta?

21. ¿Por qué la temperatura es bastante constante en las grandes

15.2 Calor

áreas de tierra rodeadas de grandes cuerpos de agua?

6. ¿Existe alguna diferencia entre energía térmica y energía

interna? ¿Qué término prefieren los físicos?

15.5 Expansión térmica

7. ¿En qué dirección fluye la energía interna entre objetos

22. ¿Por qué las sustancias se expanden cuando su

calientes y fríos?

temperatura aumenta?

8. ¿Un objeto caliente contiene energía interna o contiene calor?

23. ¿Por qué una tira bimetálica se dobla con los cambios de

9. ¿Cómo difiere el calor de la energía interna, o son dos

temperatura?

términos para la misma cosa?

24. ¿Cuáles generalmente se expanden más con un aumento

10. ¿Qué importancia tiene la temperatura en la dirección de

igual de temperatura: los sólidos o los líquidos?

flujo de la energía interna?

25. Cuando la temperatura del agua de hielo aumenta un poco,

11. ¿Cómo se determina el valor energético de los alimentos?

¿experimenta una expansión neta o una contracción neta?

12. Distingue entre una caloría y una Caloría.

26. ¿Cuál es la razón por la que el hielo es menos denso que

el agua?

13. Distingue entre una caloría y un joule.

27. ¿El "aguanieve microscópico" en el agua tiende a hacerla

14. ¿Cuántos joules se necesitan para cambiar la temperatura

más densa o menos densa?

de 1 gramo de agua en 1°C?

28. ¿Qué ocurre con la cantidad de "aguanieve microscópico"

15.3 Capacidad calorífica específica

en el agua fría cuando su temperatura aumenta?

15. ¿Qué se calienta más rápido cuando se aplica calor: el

29. ¿A qué temperatura los efectos combinados de contracción

hierro o la plata?

y expansión producen el menor volumen para el agua?

16. ¿Una sustancia que se calienta rápidamente tiene

30. ¿Por qué toda el agua de un lago tiene que enfriarse a 4°C

capacidad calorífica específica alta o baja?

antes de que el agua superficial pueda enfriarse por abajo

17. ¿Una sustancia que se enfría rápidamente tiene capacidad

de 4°C?

calorífica específica alta o baja?

P I E N S A Y R E A L I Z A *(A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 31. ¿Cuánta energía hay en una nuez? Quémala y descúbrelo.*

CO y H O. Perfora una nuez (mitades de pecana o de

2

2

El calor proveniente de la flama es energía liberada cuando

nuez de castilla funcionan mejor) con un clip doblado

el carbono y el hidrógeno de la nuez se combinan con el

que mantenga la nuez arriba de la superficie de la mesa.

oxígeno del aire (reacciones de oxidación) para producir

Encima de esto, asegura una lata de agua de modo que

298

PA

PA R T E T RES

ES

C A LO R

puedas medir su cambio de temperatura cuando arda la

se expresa en términos de la Caloría, que son 1,000 de las

nuez. Usa aproximadamente 103 cm (10 mL) de agua y un

calorías que tú medirás. De modo que, para encontrar

termómetro Celsius. En cuanto enciendas la nuez con un

el número de Calorías, divide tu resultado entre 1,000.

fósforo, coloca la lata de agua encima de el a y registra el

(Consulta el Piensa y resuelve número 36.)

aumento de temperatura del agua una vez que se extinga la

32. Escribe una carta a tus abuelos donde describas cómo

flama. El número de calorías liberadas por la nuez quemada

aprendiste a ver relaciones que hay en la naturaleza y

puede calcularse con la fórmula Q cm Δ T, donde c es su que hasta ahora se te habían escapado y cómo aprendes

calor específico (1 cal/g?C), m es la masa del agua y Δ T

a distinguir ideas relacionadas. Usa la temperatura y el

es el cambio de temperatura. La energía de los alimentos

calor como ejemplos.

S U S T I T U Y E Y L I S T O *(F A M I L I A R I Z A C I Ó N C O N E C U A C I O N E S) La cantidad de calor Q liberado o absorbido por una sustancia*

34. Usa la misma fórmula para demostrar que se necesitan

con calor específico c (que puede expresarse en unidades cal/g?C

12,570 joules para aumentar la temperatura de la misma

o J/kg?C) y masa m (en g o kg) que experimenta un cambio en masa (0.30 kg) de agua por el mismo intervalo de

temperatura Δ T es:

temperatura. Para la capacidad calorífica específica c, usa

4,190 J/kg?C.

Q** 5 **cm** D **T

35. Demuestra que 3,000 cal 12,570 J, la misma cantidad

33. Usa la fórmula para demostrar que se necesitan 3,000 cal

de energía térmica en diferentes unidades.

para aumentar la temperatura de 300 g de agua de 22C

a 30C. Para la capacidad calorífica específica c, usa

1 cal/g?C.

P I E N S A Y R E S U E L V E *(A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 36. Will Maynez quema un cacahuate de 0.6 g debajo de 50 g*

Para resolver los siguientes problemas, deberás conocer el coefi -

de agua, que aumenta su temperatura de 22 a 50C. (La

ciente de expansión lineal promedio, , que difiere para distintos capacidad calorífica específica del agua es 1.0 cal/g?C.)

materiales. Se define como el cambio de longitud (L) por unidad a. Si supones que 40% del calor liberado por el cacahuate

de longitud, o el cambio fraccional de longitud, para un cambio de que arde llega al agua (40% de eficiencia), demuestra que

temperatura de 1 C; esto es, ΔL/L por C. Para el aluminio, el valor alimenticio del cacahuate es de 3,500 calorías

24 10–6 / C, y para el acero, 11 10–6 /° C. El cambio (equivalente a 3.5 Calorías).

de longitud ΔL de un material está dado por $\Delta L = \Delta T$.

b. Luego demuestra que el valor alimenticio en calorías

39. Considera una barra de 1 m de largo que se expande

por gramo es 5.8 kcal/g (o 5.8 Cal/g).

0.6 cm cuando se calienta. Demuestra que, cuando se

calienta igualmente, una barra de 100 m del mismo

material adquiere una longitud de 100.6 m.

40. Supón que el tramo principal de acero de 1.3 km del

puente Golden Gate no tiene juntas de expansión.

Demuestra que, para un aumento en temperatura de

20C, el puente sería casi 0.3 m más largo.

41. Imagina una tubería de acero de 40,000 km que forma

un anil o que se ajusta ceñidamente en torno a la circunfe-

rencia de la Tierra. Supón que las personas a lo largo de su

longitud respiran sobre él de modo que aumentan su tem-

peratura en 1C. La tubería se vuelve más larga y ya no está

ajustada. ¿Cuán alto se encuentra sobre el nivel del suelo?

¡Demuestra que la respuesta es sorprendentemente 70 m

37. Si quieres calentar 50 kg de agua en 20C para tu

más alto! (Para simplificar, considera sólo la expansión de

ducha, demuestra que la cantidad de calor necesario

su distancia radial respecto del centro de la Tierra y aplica la

es 1,000 kcal (1,000 Cal). Luego demuestra que esto es

fórmula geométrica que relaciona la circunferencia C con el

equivalente a aproximadamente 4,200 kJ.

radio r: C 2 r.)

38. La capacidad calorífica específica del acero es 450 J/kg?C.

Demuestra que la cantidad de calor necesario para subir la

temperatura de un trozo de acero de 10 kg de 0 a 100C es

450,000 J. ¿Cómo se compara esto con el calor necesario

para aumentar la temperatura de la misma masa de agua a

través de la misma diferencia de temperatura?

C A PÍ T U LO 15 R E V ISI Ó N

299

***P I E N S A Y C L A S I F I C A** (A N Á L I S I S)*

42. Clasifica las magnitudes de estas unidades de energía

α. Cuanto mayor sea el valor de , mayor será el cambio de

térmica, de mayor a menor:

longitud para un cambio dado de temperatura. Tres tipos de

a. 1 caloría

alambres metálicos, A, B y C, se estiran entre postes telefó-

b. 1 Caloría

nicos distantes. De mayor a menor, clasifica los alambres de

c. 1 joule

acuerdo con cuánto se pandearán en un día caluroso.

43. Tres bloques de metal a la misma temperatura se colocan

a. Cobre, 17 10–6 / C

sobre una estufa caliente. Sus capacidades caloríficas

b. Aluminio, 24 10–6 / C

específicas se mencionan abajo. Clasifícalas de mayor a

c. Acero, 11 10–6 / C

menor por la rapidez con que se calienta cada uno.

45. El volumen preciso del agua en un vaso de precipitados

a. Acero, 450 J/kg?C

depende de la temperatura del agua. Clasifica, de mayor a

b. Aluminio, 910 J/kg?C

menor, los volúmenes de agua a estas temperaturas:

c. Cobre, 390 J/kg?C

a. 0C

44. El cambio de longitud de varias sustancias con los cambios de

b. 4C

temperatura está dado por sus coeficientes de expansión lineal,

c. 10C

P I E N S A Y E X P L I C A *(S Í N T E S I S)*

46. En una sala de juntas hay sillas, una mesa y gente. ¿Cuál

59. Se suministra determinada cantidad de calor tanto a un

de estas cosas tiene una temperatura (a) menor que,

kilogramo de agua como a un kilogramo de hierro. ¿Cuál

(b) mayor que o (c) igual a la temperatura del aire?

experimenta el mayor cambio de temperatura? Defiende

47. ¿Cuál es mayor: un aumento de temperatura de 1 grado

tu respuesta.

Celsius o un aumento de 1 grado Fahrenheit?

60. ¿Cuál probablemente tiene la mayor capacidad calorífica

48. En un vaso con agua a temperatura ambiente, ¿todas las

específica: un objeto que se enfría rápido o un objeto de

moléculas tienen la misma rapidez?

la misma masa que se enfría más lentamente?

49. ¿Por qué no esperarías que todas las moléculas de un gas

61. Si la capacidad calorífica específica del agua fuese menor,

tengan la misma rapidez?

¿un agradable baño caliente sería una experiencia más

50. ¿Por qué no puedes establecer si tienes temperatura alta

prolongada o más corta?

cuando te tocas la frente?

62. ¿Por qué una rebanada de sandía permanece fría durante

51. ¿Cuál tiene más energía cinética: una molécula en un

más tiempo que los emparedados cuando ambos se sacan

gramo de agua de hielo o una molécula en un gramo de

de la nevera portátil en un día caluroso?

vapor? Defiende tu respuesta.

63. El alcohol etílico tiene aproximadamente la mitad de

52. ¿Cuál tiene mayor cantidad de energía interna: un iceberg

la capacidad calorífica específica del agua. Si a iguales

o una taza de café caliente? Defiende tu respuesta.

masas de cada uno, a la misma temperatura, se les aplica

53. Cuando un termómetro de mercurio se calienta, el

igual cantidad de calor, ¿cuál experimentará mayor

mercurio se expande y eleva en el delgado tubo de vidrio.

cambio de temperatura?

¿Qué indica esto acerca de las tasas relativas de expansión

64. Cuando una cacerola metálica de 1 kg que contiene 1 kg de

para el mercurio y el vidrio? ¿Qué sucedería si sus tasas de

agua fría se saca del refrigerador y se pone en la mesa, ¿cuál

expansión fueran iguales?

absorbe más calor de la habitación: la cacerola o el agua?

54. ¿Cuál es la unidad más grande de transferencia de calor:

65. En épocas pasadas, en una fría noche de invierno, era

la Caloría, la caloría o el joule?

común llevar consigo objetos calientes a la cama. ¿Cuál

55. Imagina dos vasos, uno lleno de agua y el otro medio

te mantendría más caliente durante la noche helada: un

lleno, y el agua de los dos vasos a la misma temperatura.

bloque de hierro de 10 kg o una jarra de agua caliente de

¿En cuál vaso las moléculas de agua se mueven más

10 kg a la misma temperatura? Explica.

rápido? ¿En cuál hay mayor energía interna? ¿En cuál

66. Bermudas está aproximadamente tan al norte del ecuador

se necesitará más calor para aumentar la temperatura

como Carolina del Norte pero, a diferencia de Carolina

en 1C?

del Norte, tiene un clima subtropical todo el año. ¿Por

56. Los termómetros de un laboratorio de física con

qué esto es así?

frecuencia usan gas en lugar de mercurio. Mientras que

67. Islandia, llamada así para desalentar la conquista por*

los cambios de volumen indican la temperatura en un

parte de los imperios expansionistas, no está para nada

termómetro de mercurio, ¿qué cambios en un gas crees

cubierta de hielo, como Groenlandia y partes de Siberia,

que indiquen la temperatura en un termómetro de gas?

aun cuando no está lejos del círculo ártico. La temperatura

57. ¿Por qué la presión del gas encerrado en un recipiente

invernal promedio de Islandia es mucho mayor que en

rígido aumenta con la temperatura?

regiones a la misma latitud en Groenlandia oriental y

Siberia central. ¿Por qué esto es así?

58. Agregar la misma cantidad de calor a dos objetos

diferentes de la misma masa no necesariamente produce

**N.T. Islandia corresponde al inglés Iceland, que significa tierra el mismo aumento de temperatura. ¿Por qué no?*

de hielo.

300

PA

PA R T E T RES

ES

C A LO R

68. ¿Por qué la presencia de grandes cuerpos de agua tiende a

82. ¿Tú o la compañía de gas ganarían por tener gas caliente

moderar el clima de la tierra cercana, a hacerla más cálida

antes de que éste pase por tu medidor?

en clima frío y más fría en clima cálido?

83. Después de llenar tu tanque de gasolina hasta el borde y

69. Si los vientos en la latitud de San Francisco y

estacionar tu automóvil en luz solar directa, ¿por qué se

Washington, D.C., provinieran del este en lugar del

desborda la gasolina?

oeste, ¿por qué San Francisco sólo podría cultivar cerezos

84. Cuando un termómetro de mercurio se calienta, el nivel

y Washington, D.C., tanto cerezos como palmeras?

del mercurio momentáneamente baja antes de subir.

70. La arena del desierto es muy caliente en el día y muy

¿Puedes dar una explicación de esto?

fría en la noche. ¿Qué indica esto acerca de su capacidad

85. ¿Por qué las largas tuberías de vapor con frecuencia

calorífica específica?

tienen una o más secciones relativamente largas con

71. Cita una excepción a la afirmación de que todas las

forma de U?

sustancias se expanden cuando se calientan.

86. ¿Por qué las bombillas incandescentes por lo general están

72. ¿Una tira bimetálica funcionaría si los dos diferentes

hechas de vidrio muy delgado?

metales tuvieran las mismas tasas de expansión? ¿Es

87. Una de las razones por las que las primeras bombillas

importante que se expandan a diferentes tasas? Explica.

eran costosas se debía a los alambres conductores de

73. Las placas de acero usualmente se unen entre ellas con

platino del interior de la bombilla, necesarios porque

remaches, que se deslizan en orificios en las placas y

su expansión coincidía con la del vidrio cuando se

se redondean con martillos. La alta temperatura de los

calentaba. ¿Por qué es importante que el metal conductor

remaches los hace más fáciles de redondear, pero su

y el vidrio tengan el mismo coeficiente de expansión?

temperatura elevada tiene otra ventaja importante para

88. ¿Cuál fue la temperatura precisa del fondo del lago

proporcionar un buen ajuste. ¿Cuál es?

Superior a las 12:01 a.m. del 31 de diciembre de 2013?

74. Un antiguo método para romper rocas era ponerlas

89. Supón que en un termómetro se usa agua en lugar

al fuego y luego rociarlas con agua fría. ¿Por qué esto

de mercurio. Si la temperatura está a 4C y luego

fracturaba las rocas?

cambia, ¿por qué el termómetro no puede indicar si la

75. Después de conducir un automóvil cierta distancia, ¿por

temperatura sube o baja?

qué la presión del aire en los neumáticos aumenta?

90. Un trozo de hierro sólido se hunde en un contenedor

76. En las noches frías, en ocasiones se escuchan ruidos

de hierro fundido. Un trozo de aluminio sólido se

de quejidos estructurales en los áticos de los edificios

hunde en un contenedor de aluminio fundido. ¿Por

viejos. Ofrece una explicación en términos de expansión

qué un trozo de agua sólida (hielo) no se hunde en un

térmica.

contenedor de agua “fundida” (líquida)? Explica usando

77. Un antiguo remedio para separar un par de vasos

términos moleculares.

anidados que quedan pegados es correr agua a diferentes

91. ¿Qué ocurre con el volumen del agua a medida que se

temperaturas en el vaso interior y sobre la superficie del

enfría de 3C a 1C?

vaso exterior. ¿Cuál agua debe ser caliente y cuál fría?

92. Establece si el agua a las siguientes temperaturas se

78. ¿Por qué es importante que los espejos de vidrio que se

expandirá o contraerá cuando se caliente un poco: 0C,

utilizan en los observatorios astronómicos estén hechos

4C, 6C.

de vidrio con un "coeficiente de expansión" bajo?

93. ¿Por qué es importante proteger las tuberías de agua en el

79. En términos de expansión térmica, ¿por qué es

invierno de modo que no se congelen?

importante que una llave y su cerradura estén hechos del

94. Si el agua tuviera una capacidad calorífica específica más

mismo o de materiales similares?

baja, ¿los estanques tendrían más o menos probabilidad

80. Cualquier arquitecto te dirá que las chimeneas nunca se

de congelarse?

usan como parte de un muro de carga. ¿Por qué?

95. Si el enfriamiento ocurriera en el fondo de un estanque

81. Observa la junta de expansión en la fotografía de la

en lugar de en la superficie, ¿el estanque se congelaría

Figura 15.13. ¿Dirías que la fotografía se tomó en un día

desde el fondo hacia arriba? Explica.

caluroso o en un día frío? ¿Por qué?

P I E N S A Y D I S C U T E *(E V A L U A C I Ó N)*

96. Si sueltas una roca caliente en un balde con agua, la tem-

100. Considera un par de bolas de latón del mismo diámetro,

peratura de la roca y el agua cambiarán hasta que ambas

una hueca y la otra sólida. Ambas se calientan con igual

sean iguales. La roca se enfriará y el agua se calentará.

aumento de temperatura. Discute y compara los diáme-

¿Esto es verdadero si la roca caliente se suelta en el Océa-

tros de las bolas calentadas.

no Atlántico? Discute.

101. Después de que un maquinista desliza rápi-

97. ¿Esperarías que la temperatura del agua del fondo de las

damente un anillo de hierro caliente que

cataratas del Niágara sea un poco mayor que la tempera-

aprieta de forma ajustada sobre un cilindro

tura de la parte superior de las cataratas? ¿Por qué?

de latón muy frío, los dos no pueden sepa-

98. El calor agregado a una sustancia en parte se va a la ener-

rarse intactos. Analiza por qué esto es así.

gía cinética traslacional de sus moléculas, lo que directa-

102. Supón que cortas una pequeña brecha

mente aumenta la temperatura. Para algunas sustancias,

en un anillo metálico. Si fueras a calen-

grandes proporciones de calor también se van a vibracio-

tar el anillo, discute si la brecha se vol-

?

nes y rotaciones de las moléculas. Discute si esperarías

vería más ancha o más estrecha.

que los materiales en los que mucha energía se va en

103. Después de medir las dimensiones de

movimientos moleculares no traslacionales tuvieran una

un terreno con una cinta de acero en un día caluroso,

capacidad calorífica específica alta o baja.

regresas y vuelves a medir el mismo terreno en un día

99. Una bola metálica apenas logra

frío. ¿En cuál día determinas mayor área para el terreno?

pasar por un anillo metálico. Sin

104. En la Figura 15.21 ¿cómo diferiría la forma de la curva

embargo, cuando Anette aumenta

0C a 18C si, en lugar del volumen se graficara la densi-

la temperatura de la bola, no pasará

dad contra la temperatura? Realiza un dibujo aproximado.

por el anillo. ¿Qué sucedería si, en

105. Discute cómo se compara el volumen combinado de miles

vez de aumentar la temperatura de

y miles de millones de espacios hexagonales abiertos de las

la bola, aumenta la del anillo? Discute si el tamaño del

estructuras de los cristales de hielo de un trozo de hielo,

agujero aumenta, permanece igual o disminuye.

con la porción de hielo que flota sobre la línea de agua.

16 ***1***

C A P Í T U L O 1 6

Transferencia

de calor

2

16.1 Conducción

16.2 Convección

16.3 Radiación

16.4 Ley de Newton de enfriamiento

16.5 El efecto invernadero

16.6 Cambio climático

3

16.7 Energía solar

16.8 Cómo controlar la transferencia de calor

1 *Este par de fotografías muestran a la ingeniera aeroespacial Helen Yan,*

cuando era mi alumna en la década de 1980, quien

muestra cómo un orificio en la caja parece totalmente negro e

indica falsamente que el interior es negro. ***2*** *Los buzones cubiertos de nieve plantean una pregunta: ¿qué principio físico explica*

por qué los que tienen color claro están cubiertos de nieve, en

tanto que los negros no tienen nieve? ***3*** *Fotografías más recientes de Helen, quien muestra la misma caja. . sí, con interior blanco.*

C A PÍ T U LO 16 T R A NSFER EN CI A D E C A LO R

303

Cuando Helen Yan era la alumna con mejores califi- mismo par de fotografías a todo color y dichas fotografías caciones de mi clase de física en 1984 y se convirtió

han aparecido en las ediciones desde entonces.

en mi asistente en clase, medio en broma le suge-

En las fotografías, Helen ilustra una propiedad de la ra-

rí que continuara con la física y se convirtiera en ingeniera

diación y en la actualidad, curiosamente, el a se especializa

aeroespacial. Tal vez me lo tomó en serio porque, después de

en la radiación de la parte infrarroja del espectro. Su carrera

terminar tanto una licenciatura como una maestría en física,

científica comenzó cuando vigilaba los detal es de los lanza-

en la actualidad es ingeniera aeroespacial. En aquel entonces mientos de cohetes con Lockheed Martin. Su participación

posó para el par de fotografías

ahí consistía en elaborar diseños de sensores de visualiza-

identificadas con el núme-

ción que llevan los satélites para ver detal es de la superficie

ro 1 en la página anterior, que

de la Tierra; un trabajo fascinante. Además, enseña física de

aparecieron por primera vez tiempo parcial en el City Col ege de San Francisco e impar-en la quinta edición de Física

te el mismo curso que tomó conmigo en aquel os años.

conceptual, cuando todos los

Helen es un símbolo de la excelencia personal en mi

libros de física se imprimían carrera como profesor, así como un modelo para otros. De sólo en tinta negra. Este libro

modo que, cuando encuentres una brillante jovencita que

no se imprimió en color hasta

no esté segura de un objetivo profesional, sugiérele seguir

la séptima edición. Entonces la trayectoria de Helen y, sí, ¡que incluso se convierta en Helen posó de nuevo para el

ingeniera aeroespacial!

***16.1** Conducción*

La mayoría de las personas disfruta asar malvaviscos en una fogata. Si sostienes los malLa transferencia espontánea de

vaviscos con un tenedor metálico mientras esperas a que se tueste la

superficie y quede calor siempre va de los objetos más

crujiente, el tenedor puede calentarse tanto que ya no puedas sostenerlo. El calor entra en calientes a los objetos más fríos

el extremo del tenedor que se mantiene en las flamas y se transmite a todo su largo hasta y se realiza de tres formas: por

tu mano. Esta forma de transmisión de calor se llama ***conducción****. El fuego hace que los conducción, por convección y por*

átomos del extremo calentado del tenedor vibren con más rapidez. Dichos átomos vibran radiación.

contra los átomos vecinos, los cuales, a su vez, hacen lo mismo. Lo más importante es que los electrones libres que pueden viajar por el metal se empujan y transfieren energía al chocar con los átomos y los otros electrones libres en el interior del material.

Qué tan bien un tenedor metálico o cualquier objeto sólido conduce calor depende del enlace dentro de su estructura atómica o molecular. Los sólidos compuestos de átomos que tienen uno o más electrones exteriores "sueltos" conducen bien el calor (y la electricidad). Los metales tienen los electrones exteriores "más sueltos", los cuales tienen libertad para transportar energía mediante colisiones por todo el metal. Es por esto que los metales son excelentes conductores del calor y la electricidad. La plata es el mejor conductor, seguido del cobre y el oro, y, entre los metales comunes, el aluminio, y el hierro muy detrás.

La mayoría de los líquidos y gases son malos conductores. Los malos conductores que impiden la transferencia de calor se llaman aislantes. Madera, lana, paja, papel, corcho y espuma de estireno son buenos aislantes del calor. A diferencia de los electrones en los ***F I G U R A 1 6 .1***

metales, los electrones exteriores en los átomos de estos aislantes están firmemente unidos. Cuando tocas un clavo clavado en hielo, Puesto que la madera es un buen aislante (mal conductor) del calor, ésta se usa en los ¿el frío fluye del clavo a tu mano, o la mangos de los recipientes de cocina. Aun cuando esté caliente, puedes agarrar el mango energía fluye de tu mano al clavo?

de madera de una cazuela con la mano desnuda y retirar rápidamente la cazuela de la estufa caliente sin quemarte. Agarrar un mango de hierro a la misma temperatura seguramente te quemaría la mano. La madera es un buen aislante aun cuando esté muy caliente, es por eso que quienes caminan sobre fuego pueden andar descalzos sobre carbones al rojo vivo en

un fuego de leña sin quemarse los pies. (Precaución: No intentes hacerlo por tu cuenta; incluso los caminadores en fuego experimentados en ocasiones reciben graves ***VIDEO: El secreto para caminar sobre carbones calientes***

quemaduras cuando las condiciones no son las adecuadas: trozos de carbón pegados a los pies, por ejemplo.) El principal factor para caminar sobre fuego es la baja conductividad de la madera, incluso la madera al rojo vivo. Aunque su temperatura es alta, se transmite relativamente poco calor hacia los pies, así como poco calor se conduce por el aire cuando colocas la mano brevemente en un horno de pizza caliente. Si tocas el metal en el horno ***VIDEO: El aire es un mal conductor***

caliente, ¡Ay! De igual modo, un caminador de fuego que pisa un trozo de metal caliente

u otro buen conductor se quemará. La evaporación de la humedad en los pies húmedos también puede ser importante al caminar en fuego, como verás en el siguiente capítulo.

El aire es muy mal conductor, por lo que tu mano, como ya se dijo, no se lastima si La sensación de calor o frío con

la colocas brevemente en un horno caliente. Las buenas propiedades aislantes de mate-diferentes materiales tiene que

riales como la madera, la piel y las plumas se deben principalmente a los

espacios de aire ver con tasas de transferencia

que contienen. Otras sustancias porosas como la fibra de vidrio también son buenos de calor, no necesariamente con

temperaturas.

aislantes debido a sus muchos pequeños espacios de aire. Debes agradecer que el aire sea un mal conductor; si no lo fuera, ¡sentirías mucho frío en un día a 20 8C (68 8F)!

La nieve es un mal conductor (un buen aislante), casi igual que la madera seca. Por tanto, una manta de nieve literalmente puede mantener el calor de la tierra en invierno. Los copos de nieve se forman con cristales, que se reúnen en masas plumosas que aprisionan el aire y, en consecuencia, impiden que el calor escape de la superficie de la Tierra. Las tradicionales viviendas invernales árticas están protegidas del frío por sus cubiertas de nieve. Los animales del bosque encuentran cobijo del frío en bancos de nieve y en huecos en la nieve. La nieve no proporciona calor; simplemente retrasa la pérdida del calor que generan los animales.

F I G U R A 1 6 . 2

El calor se transmite de una temperatura más alta a una más baja. Con frecuencia El piso de loseta se siente más frío que

se escucha a las personas decir que quieren que el frío no entre en sus casas. Una mejor el piso de madera, aun cuando ambos

materiales estén a la misma temperatura. forma de expresar esto es decir que quieren impedir que el calor escape. No hay "frío"

Esto se debe a que el azulejo es un mejor que fluya al interior de una casa caliente (a menos que sobre ella sople viento frío). El conductor del calor que la madera y, por

frío es simplemente la ausencia de calor. Una casa se vuelve más fría porque el calor tanto, el calor se conduce más fácilmen-sale de ella. Las casas se aíslan con lana de roca para evitar la pérdida de calor y no para te fuera de los pies que tocan la loseta.

evitar la entrada de frío. Es importante señalar que ningún aislante puede impedir por completo la pérdida de calor. Un aislante simplemente reduce la tasa a la que el calor penetra. En invierno, incluso las casas calientes con mejor aislamiento gradualmente se enfriarán. El aislamiento retrasa la transferencia de calor.

SCREENCAST: Transferencia de calor

P U N T O D E C O N T R O L

1. En regiones desérticas que son calurosas durante el día y frías en la noche, las paredes de las casas con frecuencia están hechas de lodo.

¿Por qué es importante que las paredes de lodo sean gruesas?

2. ¿Por qué puedes colocar la mano brevemente en el interior de un horno caliente sin lastimarte, pero te quemas si tocas los lados metálicos del horno?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Una pared de grosor adecuado mantiene la casa caliente en la noche porque retrasa el flujo de calor del interior al exterior, y mantiene la casa fría durante el* ***F I G U R A 1 6 . 3***

Los patrones de nieve sobre el techo de

día porque retrasa el flujo de calor del exterior al interior. Tal pared tiene “inercia una casa muestran áreas de conducción

térmica”.

y aislamiento. Las partes desnudas

2. *Cuando colocas la mano en el aire del horno caliente, no te quemas principal-muestran dónde el calor interior se ha*

mente porque el aire es un mal conductor: el calor no viaja bien entre el aire fugado por el techo y fundido la nieve.

caliente y tu mano. Tocar los lados metálicos calientes del horno es otra historia, porque el metal es un excelente conductor y fluye mucho calor hacia tu mano.

16.2 *Convección*

Los hornos de convección son sim-

plemente hornos con un ventilador

Líquidos y gases transmiten calor principalmente mediante ***convección****, que es la interior que acelera la cocción*

transferencia de calor por el movimiento real del propio fluido. A diferencia de la con-mediante la circulación del aire

ducción (en la que el calor se transfiere mediante colisiones sucesivas de electrones y caliente.

átomos), la convección involucra el movimiento de "masas" de materia: el movimiento de todas las moléculas de un fluido.

La convección puede ocurrir en todos los fluidos, ya sean líquidos o gases. Ya sea que calientes agua en una cacerola o aire en una habitación, el proceso es el mismo (Figura 16.4). A medida que el fluido se calienta desde abajo, las moléculas del fondo comienzan a moverse más rápido, se dispersan más, se vuelven menos densas y flotan hacia arriba (principio de Arquímedes). El fluido más denso y más frío se mueve para tomar el lugar del fluido más caliente en el fondo. De esta forma, las corrientes de convección mantienen el fluido agitado mientras se calienta: el fluido más caliente se aleja de la fuente de calor y el fluido más frío se mueve hacia la fuente de calor.

(a)

En la atmósfera hay corrientes de convección y afectan la temperatura del aire.

Cuando una parcela de aire cerca del suelo se calienta, se expande, se vuelve menos densa y flota hacia arriba. El aire que sube se enfría luego, a medida que se expande aún más, y realiza trabajo sobre el aire a menor presión que encuentra a mayor altitud.

De modo que la energía adquirida en un inicio por el fragmento de aire, tal vez de la radiación solar, es más que compensada por la energía que pierde al realizar trabajo (b)

mientras se expande en su camino de ascenso. El resultado: la temperatura del aire es ***F I G U R A 16 . 4***

menor a mayor altitud (excepto por los casos especiales llamados inversiones). (Realiza (a) Corrientes de convección en aire.

el siguiente experimento en este preciso momento. Con la boca abierta, sopla sobre tu (b) Corrientes de convección en líquido.

mano. Tu aliento es caliente. Ahora repite, pero esta vez junta los labios para reducir la abertura, de modo que tu aliento se expanda a medida que sale de tu boca. ¡Observa que tu aliento es mucho más frío! El aire en expansión se enfría. Esto es lo opuesto de lo que ocurre cuando el aire se comprime. Si alguna vez has comprimido aire con una bomba para neumáticos, probablemente observaste que tanto el aire como la bomba se calentaron bastante.)

Para comprender el enfriamiento del aire en expansión piensa que las moléculas de aire son como pequeñas pelotas de ping-pong que rebotan unas contra otras. Una pelota adquiere rapidez cuando es golpeada por otra pelota que se aproxima con mayor rapidez. Pero cuando una pelota choca con otra que retrocede, su rapidez de rebote se reduce. Lo mismo sucede con una pelota de ping-pong que se mueve hacia una raqueta: adquiere rapidez cuando golpea una raqueta que se aproxima, pero pierde rapidez cuando golpea una raqueta que retrocede. La misma idea se aplica a una región de aire que se expande: las moléculas chocan, en promedio, con más moléculas que retroceden que con moléculas que se aproximan (Figura 16.6). Por eso, en el aire en expansión, la rapidez promedio de las moléculas disminuye a medida que el aire se enfría.1

F I G U R A 1 6 . 6

F I G U R A 1 6 . 5

Las moléculas en una región de aire

Sopla aire caliente sobre tu mano con la

en expansión chocan con más

boca abierta. Ahora reduce la abertura

frecuencia con moléculas que

de tus labios de modo que el aire se

retroceden que con moléculas que se

expanda mientras soplas. ¿Observas

aproximan. Por tanto, sus rapideces

alguna diferencia en la temperatura del

de rebote tienden a disminuir y, como

aire?

resultado, el aire en expansión se enfría.

1¿A dónde va la energía en este caso? En el Capítulo 18 verás que va al trabajo realizado sobre el aire circundante a medida que el aire en expansión empuja hacia afuera.

306

PA R T E T RES

C A LO R

Un ejemplo sorprendente del enfriamiento por expansión ocurre con el vapor que se expande por la boquil a de una ol a de presión (Figura 16.7). El efecto de enfriamiento tanto de la expansión como de la rápida mezcla con aire más frío te permite colocar la mano cómodamente en el chorro de vapor condensado. (Precaución: si intentas esto, asegúrate de colocar la mano suficientemente arriba sobre la boquil a y luego bajarla hasta una distancia cómoda. Si colocas la mano en la boquil a, donde no aparece vapor, ¡cuidado! El vapor es invisible cerca de la boquil a antes de haberse expandido y enfriado lo suficiente. La nube de "vapor" que ves en realidad es vapor de agua condensado, que es mucho más frío.) Las corrientes de convección que agitan la atmósfera producen vientos. Algunas partes de la superficie de la Tierra absorben calor del Sol más fácilmente que otras y, como resultado, el aire cerca de la superficie se calienta de manera

dispareja y se forman corrientes de convección. Esto es evidente en la playa. Durante el día, la playa se calienta más fácilmente que el agua. El aire sobre la playa es empujado hacia arriba (se dice que se eleva) por el aire más frío que proviene de arriba del agua y toma su lugar. El resultado es una brisa marina. Durante la noche, el proceso se invierte: la playa ***F I G U R A 1 6 . 7***

se enfría más rápidamente que el agua, y entonces el aire más caliente está sobre el mar El vapor caliente se expande desde

(Figura 16.8). Si enciendes una fogata en la playa, notarás que el humo se dirige hacia la olla de presión y es frío al tacto de

tierra firme durante el día y hacia el mar en la noche.

Millie.

La convección sucede siempre que los fluidos están sujetos a diferencias de temperatura.

Produce nubes en el cielo y contribuye a las corrientes oceánicas en las aguas del mar profundo. En el interior de la Tierra, la convección del material semifundido es la causa probable del deslizamiento de las placas tectónicas, que provocan eventos como terremotos y erupciones volcánicas. La convección desempeña una función muy importante en el Sol. La convección es un actor central en mucho de lo que ocurre a tu alrededor.

21°C

15°C

18°C

17°C

(a)

(b)

F I G U R A 1 6 . 8

Corrientes de convección producidas por calentamiento desigual de tierra y agua. (a) Durante el día, el aire caliente que está sobre la tierra asciende y el aire más frío que está sobre el agua se mueve para sustituirlo. (b) Durante la noche, la dirección del flujo de aire se invierte porque entonces el agua es más caliente que la tierra.

P U N T O D E C O N T R O L

Puedes colocar los dedos al lado de la llama de la vela sin quemarte, pero no arriba de la llama. ¿Por qué?

F I G U R A 1 6 . 9

Un calefactor en la punta de un tubo

en forma de J sumergido en agua

produce corrientes de convección, que

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

se revelan como sombras (causadas por

El aire caliente viaja hacia arriba por convección del aire. Dado que el aire es un mal las desviaciones de la luz en el agua a

conductor, muy poco calor viaja hacia los lados, hacia tus dedos.

diferentes temperaturas).

PRACTICANDO LA FÍSICA

S

Agua

ostén con la mano el fondo de un tubo de ensayo lleno de agua fría. Calienta la hirviendo

parte superior en una llama hasta que el agua hierva. El hecho de que todavía Lana de

puedas sostener el fondo del tubo de ensayo demuestra que el vidrio y el agua acero

son malos conductores de calor y que la convección no mueve el agua caliente hacia abajo. Esto es incluso más impresionante cuando calzas trozos de hielo en el fondo con un poco de lana de acero; entonces el agua que está encima puede hervir sin fundir el hielo. Inténtalo y observa.

Hielo

***16.3** Radiación*

La energía del Sol pasa a través del espacio y luego a través de la atmósfera de la Tierra y calienta la superficie de la Tierra. Esta energía no pasa a través de la atmósfera por conducción, porque el aire es un mal conductor. Tampoco pasa por convección, porque la ***SCREENCAST: Energía radiante***

convección comienza sólo después de que la Tierra se calienta. También sabes que ni la convección ni la conducción son posibles en el espacio vacío entre la atmósfera y el Sol. Puedes ver que la energía debe transmitirse por algún otro medio: por ***radiación****.2*

La energía así radiada se llama energía radiante.

F I G U R A 1 6 . 1 0

Tipos de energía radiante (ondas

Ondas

Ondas infrarrojas

electromagnéticas).

de luz

Ondas

de radio

La energía radiante está en forma de ondas electromagnéticas. Incluye ondas de radio, microondas, radiación infrarroja, luz visible, radiación

ultravioleta, rayos X

y rayos gamma. Estos tipos de energía radiante se mencionan en orden de longitud de onda, de la más larga a la más corta. La radiación infrarroja (abajo del rojo) tiene longitudes de onda más largas que la luz visible. Las longitudes de onda visibles más largas son las de la luz roja, y las más cortas son las de la luz violeta. La radiación ultravioleta (más allá del violeta) tiene longitudes de onda más cortas. (La longitud de onda se aborda con más detalle en el Capítulo 19, y las ondas electromagnéticas se cubren con más detalle en los Capítulos 25 y 26.)

La longitud de onda de la radiación se relaciona con la frecuencia de la radiación. La frecuencia es la tasa de vibración de una onda. La niña de la Figura 16.11 sacude una ***FIGURA 16.11***

cuerda a una frecuencia baja (arriba) y a una frecuencia más alta (abajo). Observa que la Cuando la cuerda se sacude lentamente sacudida a baja frecuencia produce una onda floja larga, y la sacudida a frecuencia más (a baja frecuencia) se produce una onda alta produce ondas más cortas. Lo mismo sucede con las ondas electromagnéticas. En con longitud de onda larga. Cuando el Capítulo 26 verás que los electrones en vibración emiten ondas electromagnéticas. se sacude más rápidamente (a una fre-Las vibraciones de baja frecuencia producen ondas con longitud de onda larga y las cuencia alta), se produce una onda con vibraciones de alta frecuencia producen ondas cortas.

longitud de onda más corta.

2La radiación de la que se habla aquí es radiación electromagnética, incluida la luz visible. No confundas esto con la radiactividad, un proceso del núcleo atómico que estudiarás en la Parte 7.

C A LO R

Emisión de energía radiante

Todas las sustancias a cualquier temperatura por arriba del cero absoluto emiten energía radiante. La frecuencia pico

La radiación de la Tierra es radia-

f d T

e la energía radiante es directamente proporcional

ción terrestre. La radiación del Sol

a la temperatura absoluta (Kelvin) T del emisor (Figura 16.12): es radiación solar. Ambas están en

regiones dentro del espectro elec-

$f \propto T$

tromagnético. (¿Cómo llamarías

Si un objeto está suficientemente caliente, parte de la energía radiante que emite a la radiación proveniente de esa

persona especial para ti?)

está en el rango de la luz visible. A una temperatura de aproximadamente 5008C, un objeto comienza a emitir la radiación con la longitud de onda más larga que puedes ver, la luz roja. A medida que su temperatura aumenta, se vuelve "rojo vivo", luego ***F I G U R A 1 6 . 1 2***

Luz visible

Curvas de radiación para diferentes

temperaturas. La frecuencia pico de

la energía radiante es directamente

proporcional a la temperatura absoluta

T = 3,200 K

del emisor.

T = 2,400 K

Frecuencias pico

T = 1,600 K

Intensidad de radiación

Frecuencia

parece amarillenta y, a alrededor de los 5,0008C, donde emite luz

fuertemente en todas las longitudes de onda visible, está al "rojo blanco". Una estrella azul es más caliente que una estrella blanca, la cual, a su vez, es más caliente que una estrella roja. Si una estrella azul particular emite luz del doble de la frecuencia pico de la luz de cierta estrella roja, la estrella azul tendría el doble de la temperatura superficial que la estrella roja.3

F I G U R A 1 6 . 1 3

Puesto que la superficie del Sol tiene una temperatura alta (para los estándares te-Tanto el Sol como la Tierra emiten el

rrestres), emite energía radiante de alta frecuencia, gran parte de ella en la región visible mismo tipo de energía radiante. El bri-del espectro electromagnético. En comparación, la superficie de la Tierra es relativamen-llo del Sol es visible al ojo humano; el

te fría y, en consecuencia, la energía radiante que emite consiste en frecuencias más brillo de la Tierra consiste en longitudes bajas que las de la luz visible. La radiación emitida por la Tierra está en forma de ondas de onda más largas y no son visibles al

infrarrojas, por debajo del umbral de visión humano. La energía radiante emitida por ojo humano.

la Tierra se llama ***radiación terrestre****.*

(a)

La energía radiante del Sol surge de las reacciones nucleares en su interior profundo. Del mismo modo, las reacciones nucleares en el interior de la Tierra calientan el fría

planeta (visita las profundidades de cualquier mina y descubrirás que ahí abajo hace (b)

calor. . todo el año). Gran parte de esta energía interna se dirige hacia la superficie para media

convertirse en radiación terrestre.

(c)

Todos los objetos (tú, tu profesor y todo lo que te rodea) continuamente emiten energía radiante sobre un rango de frecuencias. Los objetos con temperaturas cotidianas caliente

emiten principalmente ondas de baja frecuencia que son invisibles al ojo humano, llama-F I G U R A 1 6 . 1 4

das infrarrojas. Cuando tu piel absorbe ondas infrarrojas de frecuencia más alta, como (a) Una fuente de baja temperatura (fría)

cuando te paras al lado de una estufa caliente, tienes la sensación de calor. Así que es emite principalmente ondas con longitud

común referirse a la radiación infrarroja como radiación térmica. Las fuentes infrarro-de onda larga y baja frecuencia.

jas comunes que producen la sensación de calor son el Sol, el filamento de una lámpara (b) Una fuente de temperatura media

y las ascuas ardientes de una fogata.

emite principalmente ondas con longitud

La radiación térmica es la base de los termómetros infrarrojos. Simplemente apun-de onda media y frecuencia media.

tas el termómetro hacia algo cuya temperatura quieres conocer, oprimes un botón y (c) Una fuente de alta temperatura

(caliente) emite principalmente ondas con 3La cantidad de energía radiante Q emitida por un objeto es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura longitud de onda corta y alta frecuencia.

Kelvin, Q ~ T 4.

PIZZA

aparece una lectura digital de temperatura. La radiación emitida por el objeto proporciona la lectura. Los termómetros infrarrojos didácticos comunes operan en el rango de alrededor de –30 a 2008C.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Alguno de los siguientes no proporciona energía radiante? (a) El Sol, (b) lava de un volcán, (c) carbones al rojo vivo, (d) este libro que lees.

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

F I G U R A 1 6 . 1 5

Ojalá no hayas respondido (d), el libro. ¿Por qué? Porque el libro, como las otras Un termómetro infrarrojo mide la ener-sustancias mencionadas, tiene temperatura, aunque no tan alta. De acuerdo con gía radiante infrarroja emitida por un

la regla f T éste, por tanto, emite radiación cuya frecuencia pico f e T s muy baja cuerpo y la convierte a temperatura.

comparada con las frecuencias de radiación emitidas por las demás sustancias. Todo lo que tenga una temperatura por arriba del cero absoluto emite radiación electromagnética. Así es: ¡todo!

Absorción de energía radiante

Si todo emite energía, ¿por qué al final no todo se queda sin energía? La respuesta es que todo también absorbe energía. Los buenos emisores de energía radiante también son buenos absorbentes; los malos emisores son malos absorbentes. Por ejemplo, una antena de radio construida para ser buen emisor de ondas de radio también es, por su mismo diseño, un buen receptor (absorbente) de ellas. Una antena transmisora con un mal diseño también es mala receptora.

La superficie de cualquier material, caliente o fría, absorbe y emite energía radiante.

Si la superficie absorbe más energía de la que emite, es un absorbente neto y su temperatura aumenta. Si emite más de la que absorbe, es un emisor neto y su temperatura cae.

El que una superficie desempeñe la función de emisor neto o de absorbente neto depende de si su temperatura está por arriba o por debajo de la de su entorno. Si la superficie es más caliente que sus alrededores, será un emisor

neto y se enfriará. Si su superficie es más fría que sus alrededores, será un absorbente neto y se volverá más caliente.

Toda superficie, caliente o fría, tanto absorbe como emite energía radiante.

Puedes verificar esto con un par de recipientes metálicos del mismo tamaño y forma, uno con una superficie blanca o especular y el otro con una superficie negra (Figu- ***F I G U R A 16 .16***

ra 16.17). Llena los recipientes con agua caliente y coloca un termómetro en cada uno. La pizza que disfruta Dennis McNelis es Descubrirás que el recipiente negro se enfría más rápido. La superficie negra es una me- un emisor neto. La misma pizza sería un jor emisora. El café o el té permanecen calientes más tiempo en un recipiente brillante absorbente neto si fuese más fría que sus que en uno oscuro. El mismo experimento puede realizarse a la inversa. Esta vez, llena alrededores. Si algo es un emisor neto cada recipiente con agua helada y coloca los recipientes enfrente de una fogata, en el o un absorbente neto depende de las exterior durante un día caluroso o en cualquier lugar donde haya una buena fuente de temperaturas relativas.

energía radiante. Descubrirás que el recipiente negro se calienta más rápido. Como se dijo, un objeto que emite bien también absorbe bien.

P U N T O D E C O N T R O L

1. Si un buen absorbente de energía radiante fuese un mal emisor, ¿cómo se compararía su temperatura con la temperatura de sus alrededores?

F I G U R A 1 6 . 1 7

2. Un granjero enciende el quemador de propano en su granero una

Cuando los recipientes están llenos de

mañana fría y calienta el aire a 208C (688F). ¿Por qué todavía siente frío?

agua caliente (o fría), el negro se enfría

(o se calienta) más rápido.

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Si un buen absorbente no fuera también un buen emisor, habría una absorción La emisión y la absorción en la*

neta de energía radiante y la temperatura del absorbente permanecería más alta parte visible del espectro son

que la temperatura del entorno. Las cosas que te rodean se aproximan a una tem-afectadas por el color, en tanto

peratura común sólo porque los buenos absorbentes también son, por su misma que la parte infrarroja del espectro

naturaleza, buenos emisores.

se afecta más por la textura de la

superficie. Un acabado mate emi-

2. *Las paredes del granero todavía están frías. El granjero radia más energía hacia las te/absorbe mejor en el infrarrojo*

paredes de la que las paredes radian de vuelta, y él siente frío. (Dentro de tu casa o que uno pulido, cualquiera que sea

salón de clase, estás cómodo sólo si las paredes están calientes, no sólo el color.

el aire.)

Reflexión de energía radiante

Absorción y reflexión son procesos opuestos. Un buen absorbente de energía radiante refleja muy poca energía radiante, incluida la luz visible. Por tanto, una superficie que refleja muy poca o ninguna energía radiante parece oscura. De modo que un buen absorbente parece oscuro y un absorbente perfecto no refleja energía radiante y parece completamente negro. La pupila del ojo, por ejemplo, permite la entrada de luz casi sin reflexión, por lo que parece negra. (Una excepción ocurre en las fotograF I G U R A 1 6 . 1 8

fías con flash, cuando las pupilas parecen rojas. La luz muy brillante se refleja de la La radiación que entra en la cavidad tiene

superficie interior roja del ojo y regresa a través de la pupila.)

poca posibilidad de salir porque la mayor

parte se absorbe. Por esta razón, la aber-

Observa el extremo abierto de las tuberías en una pila; los agujeros parecen negros.

tura de cualquier cavidad parece negra.

Observa las puertas o ventanas abiertas de las casas distantes durante el día y, también, parecen negras. Las aberturas parecen negras porque la luz que entra en ellas se refleja de ida y vuelta en las paredes interiores muchas veces y se absorbe parcialmente en cada reflexión. Como resultado, queda muy poca luz para regresar por la abertura y viajar hacia tus ojos (Figura 16.18). Helen Yan ilustró esto muy bien en las fotografías del inicio del capítulo.

Los buenos reflectores, por otra parte, son malos absorbentes. La nieve

limpia es un buen reflector y, por tanto, no se derrite rápidamente en la luz solar. Si la nieve está sucia, absorbe energía radiante del Sol y se funde más rápido. Rociar hollín negro desde un avión sobre las montañas cubiertas de nieve es una técnica que se usa a veces en el control de aluviones. En consecuencia, se logra la fusión controlada en momentos favorables, en lugar de un súbito desprendimiento de nieve fundida.

Enfriamiento en la noche mediante radiación

Los cuerpos que radian más energía de la que reciben se vuelven más fríos. Esto sucede en la noche cuando no hay radiación solar. Un objeto que se deja en el exterior durante la noche radia energía hacia el espacio y, debido a que el espacio en sí es extremadamente frío, recibe muy poca energía a cambio. Por ende, cede más energía de la que recibe y se vuelve más frío. Pero si el objeto es un buen conductor de calor (como el ***F I G U R A 1 6 . 1 9***

metal, la piedra o el concreto), se conduce calor desde el suelo, lo que estabiliza un La mayor parte del calor proporciona-poco su temperatura. Por otra parte, los materiales como la madera, la paja y el vidrio do por un radiador calefactor se logra

son malos conductores y se conduce poco calor del suelo a su interior. Estos materiales mediante convección, de modo que el

aislantes son radiadores netos y se vuelven más fríos que el aire. Es común que se forme color hace poca diferencia (un mejor nom-escarcha sobre estos tipos de materiales aun cuando la temperatura del aire no baje bre para este tipo de calefactor sería con-hasta la congelación. ¿Alguna vez has visto un prado o campo cubierto con escarcha vector). Sin embargo, para una eficiencia

en una mañana fría, pero por encima del punto de congelación, antes de salir el Sol?

óptima, un radiador pintado de plateado

La próxima vez que veas esto, observa que la escarcha sólo se forma sobre el pasto, la radiará menos, se volverá y permanecerá

más caliente, y calentará mejor el aire. ¡Así paja u otros malos conductores, pero no se forma en el cemento, las piedras u otros que pinta tu radiador de plateado!

buenos conductores.

Los jardineros serios cubrirán sus plantas con un toldo cuando espe-

ren una helada. Las plantas radian justo como antes, pero ahora reciben energía radiante del toldo en lugar del oscuro cielo nocturno. Puesto que el toldo radia como un objeto a la temperatura del entorno en lugar de a la temperatura del frío cielo oscuro, no se forma escarcha en las hojas de las plantas. Ésta es la misma razón por la que las plantas en un porche cubierto no tendrán escarcha sobre ellas, en tanto que las plantas expuestas al cielo abierto sí la tendrán.

La Tierra misma intercambia radiación con sus alrededores. El Sol es

una parte dominante de los alrededores de la Tierra durante el día. La mitad de la Tierra iluminada por el Sol absorbe más energía radiante que la que emite. En la noche, si el aire es relativamente transparente y no está cubierto de nu- ***F I G U R A 1 6 . 2 0***

bes, la Tierra radia más energía al espacio profundo de la que recibe a cambio. Como Los pedazos de cristales de escarcha los investigadores de los Bell Laboratories, Arno Penzias y Robert Wilson, aprendieron revelan las entradas ocultas de las en 1965, el espacio exterior tiene una temperatura: aproximadamente 2.7 K (2.7 gra- madrigueras de los ratones. ¡Cada grupo dos arriba del cero absoluto). El espacio en sí emite una radiación débil característica de cristales es el aliento congelado del

ratón!

de dicha temperatura baja.4

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Cuál es probablemente más fría: una noche cuando puedes ver las *En cualquier hora dada, más ener-estrellas o una noche cuando no puedes verlas?*

gía del Sol llega a la Tierra que

toda la energía usada por todas

2. En invierno, ¿por qué, en la carretera, la superficie de un puente tiende *las fuentes de toda la población*

a estar más helada que las superficies a ambos extremos del puente?

humana en cualquier año dado.

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Es más fría la noche estrellada, cuando la superficie de la Tierra radia directamente hacia el gélido espacio profundo. En una noche nublada, la radiación neta es menor, porque las nubes radian energía de vuelta a la superficie de la Tierra.*

2. *La energía radiada por las carreteras sobre tierra firme se recarga parcialmente por el calor conducido desde el suelo más caliente bajo el pavimento. Pero no hay contacto térmico entre las superficies del camino de los puentes y el suelo, de modo que reciben muy poca, o ninguna, energía de reabastecimiento conducida desde el suelo. Es por esto que las superficies de las carreteras sobre los puentes se vuelven más frías que las carreteras en tierra, lo que aumenta la posibilidad de formación de hielo sobre los puentes. ¡Comprender la transferencia de calor puede hacer de ti un conductor más seguro!*

16.4 *Ley de Newton de enfriamiento*

Por sí mismos, los objetos más calientes que sus alrededores a la larga se enfrían hasta coincidir con la temperatura circundante. La tasa de enfriamiento depende de cuánto más caliente sea el objeto que sus alrededores. Una tarta de manzana caliente se enfriará más cada minuto si se pone en un congelador frío que si se deja en la mesa de la cocina. Eso se debe a que, en el congelador, la diferencia de temperatura entre la tarta y

sus alrededores es mayor. De igual modo, la tasa a la que una casa caliente vierte energía interna hacia los exteriores fríos depende de la diferencia entre las temperaturas interior y exterior.

F I G U R A 1 6 . 2 1

4Penzias y Wilson compartieron un Premio Nobel por su descubrimiento de la "radiación de fondo cósmico", El largo pie de la copa de vino ayuda a

considerada una reliquia del Big Bang. Su temperatura ahora se ha medido hasta la increíble exactitud de evitar que el calor de la mano caliente 2.725 K, y está revelando mucho sobre la historia temprana del Universo y su composición actual.

el vino.

La tasa de enfriamiento de un objeto (ya sea por conducción, por convección o por radiación) es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperatura Δ T entre el objeto y sus alrededores.

Es interesante que la ley de

Newton de enfriamiento sea una

Tasa de enfriamiento ~ Δ T

relación empírica y no una ley

Esto se conoce como ***ley de Newton de enfriamiento****. (¿Adivina a quién se acredita fundamental como las leyes de*

movimiento de Newton.

el descubrimiento de esto?) La ley también se aplica al calentamiento. Si un objeto es más frío que sus alrededores, su tasa de calentamiento también es proporcional a ΔT*.*

La comida congelada se calentará más rápido en una habitación caliente que en una habitación fría.5

La tasa de enfriamiento que experimentas en un día frío puede aumentar con el efecto convectivo agregado del viento. De esto se habla en términos del factor de enfriamiento del viento. Por ejemplo, un factor de enfriamiento del viento de –208C significa que se pierde calor a la misma tasa que si la temperatura fuera de –208C sin viento.

P U N T O D E C O N T R O L

Dado que una taza caliente de té pierde calor más rápidamente que una taza templada de té, ¿es correcto decir que una taza caliente de té se enfriará a temperatura ambiente antes que una taza templada de té?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

¡No! Aunque la tasa de enfriamiento sea mayor para la taza más caliente, tiene que enfriarse más para alcanzar equilibrio térmico. El tiempo extra es igual al tiempo que tarda en enfriarse hasta llegar a la temperatura inicial de la taza templada de té. La tasa de enfriamiento y el tiempo de enfriamiento no son la misma cosa.

16.5 *El efecto invernadero*

Un automóvil estacionado en la calle bajo el Sol brillante de un día caluroso con las ventanas cerradas puede volverse muy caliente en su interior, mucho más caliente que el aire exterior. Éste es un ejemplo del ***efecto invernadero****, así llamado por el mismo efecto de aumento de la temperatura de los invernaderos de vidrio de los floristas. Para comprender el efecto invernadero es necesario entender dos conceptos.*

El primer concepto ya se señaló: todas las cosas radian, y la frecuencia y longitud de onda de la radiación dependen de la temperatura del objeto que emite la radiación.

Una función muy importante del

Los objetos a alta temperatura radian longitudes de onda cortas; los objetos a baja tem-vidrio en el invernadero de un

florista es evitar la convección del

peratura radian longitudes de onda largas. El segundo concepto que necesitas conocer aire exterior más frío con el aire

es que la transparencia de las cosas, como el aire y el vidrio, depende de la longitud interior más caliente. De modo

de onda de la radiación. El aire es transparente tanto para las longitudes de onda que el efecto invernadero en rea-infrarrojas (largas) como para las longitudes de onda visibles (cortas), a menos que el lidad es mucho más importante en

aire contenga vapor de agua y dióxido de carbono en exceso, en cuyo caso es opaco al el calentamiento global que en el

calentamiento de los invernaderos

infrarrojo. El vidrio es transparente a las longitudes de onda de la luz visible, pero es de los floristas.

opaco a las longitudes de onda infrarrojas. (La física de la transparencia y la opacidad se estudia en el Capítulo 26.)

5Un objeto caliente que contenga una fuente de energía puede permanecer más caliente que sus alrededores de manera indefinida. La energía interna que emite no necesariamente lo enfría, y la ley de Newton de enfriamiento no se aplica. Por ende, el motor en operación de un automóvil permanece más caliente que el cuerpo del automóvil y el aire circundante. Pero, después de apagar el motor, se enfría en concordancia con la ley de Newton de enfriamiento y gradualmente se aproxima a la misma temperatura que sus alrededores. Del mismo modo, el Sol permanecerá más caliente que sus alrededores en tanto su horno nuclear funcione... otros 5 mil millones de años más o menos.

F I G U R A 1 6 . 2 2

La radiación con longitud de

El vidrio es transparente a la radiación

onda corta proveniente del Sol se

con longitud de onda corta, pero opaco

transmite a través del vidrio.

a la radiación con longitud de onda

La energía con

larga. La energía vuelta a radiar por la

longitud de onda

planta tiene una longitud de onda larga,

larga vuelta a

porque la planta tiene una temperatura

radiar no se

relativamente baja.

transmite a través

del vidrio y queda

atrapada en el

interior.

Ahora, respecto de por qué el automóvil se vuelve tan caliente en la luz solar bril ante: comparada con el automóvil, la temperatura del Sol es muy alta. Esto significa que las longitudes de onda radiadas por el Sol son muy cortas. Dichas longitudes de onda cortas pasan fácilmente a través tanto de la atmósfera de la Tierra como de las ventanas de vidrio del automóvil. De modo que la energía proveniente del Sol llega al interior del automóvil, donde, excepto por la reflexión, se absorbe. El interior del automóvil se calienta. El interior del automóvil radia sus propias longitudes de onda pero, dado que no es tan caliente como el Sol, las longitudes de onda son más largas. Las longitudes de onda largas vueltas a radiar encuentran vidrio que no es transparente para el as. Así que la energía vuelta a radiar permanece en el automóvil, lo que calienta todavía más el interior del automóvil Ondas cortas solares

(por eso, dejar a tu mascota en el automóvil en un día soleado es un error rotundo).

Ondas largas

El mismo efecto ocurre en la atmósfera de la Tierra, que es transparente a la raterrestres

diación solar. La superficie de la Tierra absorbe esta energía y vuelve a radiar parte de ésta como radiación terrestre con longitud de onda más larga. Los gases atmosféricos (principalmente el vapor de agua y el dióxido de carbono) absorben y vuelven a emitir gran parte de esta radiación terrestre con longitud de onda larga de vuelta a la Tierra.

La radiación terrestre que no puede escapar de la atmósfera de la Tierra impide que la Tierra

Tierra se enfríe mucho. Este efecto invernadero es muy agradable, pues de otro modo la Tierra tendría unos gélidos 188C. Durante los últimos 500,000 años la tempera- ***F I G U R A 16 . 23***

tura promedio de la Tierra ha fluctuado entre eras de hielo por abajo de cero y 158C, El Sol caliente emite longitudes de onda y 158C es el punto alto actual, y está en ascenso.

cortas y la Tierra fría emite longitudes

Aunque el H O es el principal gas de efecto invernadero en la atmósfera, el segundo de onda largas. El vapor de agua, el dió-2

gas de efecto invernadero más abundante, el CO , es notorio porque los seres humanos lo xido de carbono y otros "gases de efecto 2

aportan cada vez más. Por desgracia, mayor calentamiento por CO puede disparar tam- invernadero" en la atmósfera retienen el 2

bién más H O. De modo que la preocupación ambiental actual es la combinación de can- calor que de otro modo se radiaría de la 2

tidades cada vez más altas de estas dos moléculas en la atmósfera, lo que aumentaría aún Tierra hacia el espacio.

más la temperatura y produciría un nuevo equilibrio térmico desfavorable para la biosfera.

***16.6** Cambio climático*

Un principio importante es que "nunca puedes cambiar sólo una cosa". Cambia una cosa, y cambias otra. Una temperatura terrestre un poco más alta significa océanos un poco más calientes, lo que significa ascenso de los niveles del mar y cambios en los patrones climáticos y de las precipitaciones. El consenso entre los científicos es que el clima de la Tierra se ha calentado mucho muy rápido, y sigue haciéndolo. Este fenómeno se llama calentamiento global o su resultado: cambio climático.

El tiempo es el estado de la atmósfera en un momento y lugar particulares: su temperatura, humedad, presión, precipitación, viento y nubes. El clima es el patrón de tiempo sobre regiones más amplias y tiempos más prolongados. Un verano caliente o un solo huracán no son evidencia del calentamiento global o del cambio climático. El calentamiento global y el cambio climático son más que fluctuaciones del tiempo, que vienen y se van. El consenso científico es que el cambio climático está aquí.

Cómo evolucionará esto, no se sabe. En un extremo, pueden hacerse correcciones y la vida estará bien para los habitantes de la Tierra. En el otro extremo, se recuerda al planeta Venus, que en épocas anteriores pudo haber tenido un clima un poco similar al de la Tierra, hasta que un efecto invernadero galopante condujo a su atmósfera actual: 96% CO , 2

con una temperatura superficial promedio de 4608C. Venus es el planeta más caliente del sistema solar. Y no hay duda de que no se quiere seguir su destino. Es probable que se necesite vigilancia, no sólo suerte, para que la Tierra siga siendo agradable y habitable durante los próximos siglos.

Algo que no se sabe es el efecto a largo plazo de los microbios y parásitos patógenos cuando sus hábitats naturales cambian en formas básicas. Tampoco se sabe la manera como la agricultura hará frente a los suelos secos cuando escasee el agua para riego. Lo que sí se sabe es que los modelos climáticos indican que los ecosistemas y los cultivos humanos de todo el mundo se perturbarán seriamente debido al derretimiento de glaciares, aumento del nivel del mar y eventos climáticos más extremos. También se sabe que el consumo de energía y los cambios en la atmósfera guardan relación con el tamaño de la población. Ya es tiempo de que la humanidad aborde el tema del crecimiento continuo.

(Por favor: date tiempo para leer el Apéndice E, "Crecimiento exponencial y tiempo de duplicación"; un material muy importante.)

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Qué termina por suceder con la energía solar que cae sobre la Tierra?

2. ¿Qué significa decir que el efecto invernadero es como una válvula de una vía?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Tarde o temprano, se radiará de vuelta al espacio. La energía siempre está en tránsito: puedes rentarla, pero no poseerla.*

2. *El material transparente, como lo es la atmósfera para la Tierra y el vidrio para el invernadero, sólo permite el ingreso de las longitudes de onda cortas y bloquea la salida de las longitudes de onda largas. Como resultado, la energía radiante queda atrapada en el interior del "invernadero".*

16.7 *Energía solar*

Potencia solar es lo que tienes

una vez que la energía solar se

Si caminas de la sombra a la luz solar, eres calentado considerablemente. El calor que sien-convierte en electricidad. Esto

tes no se debe tanto a que el Sol sea caliente, pues su temperatura superficial de 6,000°C

se puede lograr mediante cel-

no es más caliente que las flamas de algunos sopletes de soldadura. Te calientas princi-das fotovoltaicas o al cambiar

palmente porque el Sol es muy grande.6 Como resultado, emite enormes cantidades de agua a vapor para impulsar un

energía, de la cual menos de una parte en un bil ón llega a la Tierra. No obstante, la generador.

cantidad de energía radiante recibida a cada segundo sobre cada metro cuadrado en ángulo recto con respecto a los rayos del Sol en lo alto de la atmósfera es de 1,400 joules (1.4 kJ). Esta entrada de energía se llama ***constante solar****. Esto es equivalente, en unidades de potencia, a 1.4 kilowatts por metro cuadrado (1.4 kW/m2). La* ***potencia solar*** *es la tasa a la que la energía solar se recibe del Sol. La cantidad de potencia solar que llega al suelo es atenuada por la atmósfera y reducida por ángulos de elevación no perpendiculares del Sol. Además, desde luego, cesa durante la noche. La potencia solar recibida en Estados Unidos, promediada durante día y noche, verano e invierno, es de aproximadamente 13%*

la constante solar (0.18 kW/m2). Esta cantidad de potencia, que ilumina el techo de un hogar estadounidense común, es el doble de la potencia necesaria para calentar y enfriar ***F I G U R A 1 6 . 2 4***

cómodamente la casa todo el año. Cada vez más hogares captan la energía solar para ca-Sobre cada metro cuadrado de área

lentamiento de espacios y agua. También están ganando popularidad las tejas fotovoltaicas perpendicular a los rayos del Sol en lo

que se mezclan de manera casi impecable con los materiales de los techos.

alto de la atmósfera, el Sol vierte 1,400 J

de energía radiante a cada segundo. Por

6Para visualizar cuán grande es el Sol, date cuenta de que su diámetro es más de tres veces la distancia entre la tanto, la constante solar es 1.4 kJ/s/ m2 o

Tierra y la Luna. De modo que, si la Tierra y la Luna estuvieran dentro del Sol, con la Tierra en el centro solar, 1.4 kW/m2.

la Luna estaría muy profundo en el interior. ¡El Sol es realmente grande!

PRACTICANDO LA FÍSICA

¿La distancia al Sol, o el ángulo de los rayos del Sol sobre la Tierra, explican las regiones polares gélidas y las regiones ecuatoriales tropicales? Puedes ver la respuesta por ti mismo si sostienes una linterna sobre una superficie y observas su brillantez.

Cuando la luz golpea perpendicularmente, la energía luminosa se concentra, pero cuando la superficie se inclina, manteniendo la misma distancia, la luz incidente se dispersa más. ¿Puedes ver que la misma energía sobre un área más grande es semejante a las bajas temperaturas de las regiones ártica y antártica de la Tierra?

El dibujo a la derecha es de la Tierra con rayos de luz paralelos provenientes del Sol.

Cuenta el número de rayos que golpean la región A y la región B de igual

área. ¿Dónde A

es menor la energía por unidad de área? ¿Cómo se relaciona esto con el clima?

B

F I G U R A 1 6 . 2 5

Los calentadores solares de alta tecno-

logía están cubiertos con vidrio para

proporcionar un efecto invernadero, lo

que calienta aún más el agua.

La portada de este libro muestra sistemas fotovoltaicos que convierten luz solar directamente en electricidad. Las celdas fotovoltaicas pueden diseñarse para necesidades de potencia que van desde miliwatts hasta megawatts, y alimentar una calculadora o un generador en una planta eléctrica. También pueden ubicarse en áreas remotas que no son fácilmente accesibles a las líneas de la red eléctrica. Los sistemas de recolección ***F I G U R A 1 6 . 2 6***

y concentración de energía solar, ya sean arreglos de espejos o celdas fotovoltaicas, es- Un uso sencillo y efectivo de la energía tán compitiendo en costo con la energía eléctrica generada por las fuentes de energía solar.

convencionales.

***16.8** Cómo controlar la transferencia de calor*

Una manera agradable de repasar los métodos de transferencia de calor es pensar en un dispositivo que inhibe los tres métodos: el termo. Un termo (conocido por su nombre comercial Thermos) consiste en un recipiente de vidrio con doble pared, con un vacío entre las paredes y una tapa hermética de corcho o plástico. (Por lo general también hay una cubierta exterior.) Las superficies de vidrio que están una frente a la otra son plateadas. Cualquier líquido, caliente o frío, en un termo permanecerá cerca de su temperatura original durante muchas horas.

***1.** La transferencia de calor por conducción a través del vacío es imposible. Un poco de calor escapa por conducción a través del vidrio y la tapa, pero éste es un proF I G U R A 1 6 . 2 7*

ceso lento, porque el vidrio, el plástico y el corcho son malos conductores.

Una botella Thermos.

2. *El vacío no tiene fluido para convección, así que no hay pérdida de calor a través de las paredes por convección.*

3. *La pérdida de calor por radiación se reduce con las superficies plateadas de las paredes, que reflejan las longitudes de onda térmicas de vuelta a la botella.*

R E S U M E N D E T É R M I N O S *(C O N O C I M I E N T O)*

Conducción. *La transferencia de energía térmica mediante*

temperatura entre el objeto y sus alrededores. (Lo mismo

colisiones moleculares y de electrones dentro de una

sucede con la ganancia de calor por parte de un objeto frío.)

sustancia (especialmente un sólido).

Efecto invernadero. *Calentamiento de la atmósfera inferior*

Convección. *La transferencia de energía térmica en un gas o*

mediante la radiación con longitud de onda corta

en un líquido mediante corrientes en el fluido calentado. El

proveniente del Sol que penetra la atmósfera, es absorbida

fluido se mueve y transporta energía consigo.

por la Tierra y se vuelve a radiar con longitudes de onda

más largas que no pueden escapar con facilidad de la

Radiación. *La transferencia de energía mediante ondas*

atmósfera de la Tierra.

electromagnéticas.

Constante solar. *1,400 J/m2 recibidos del Sol a cada segundo*
Radiación terrestre. *La radiación emitida por la Tierra hacia el en lo alto de la atmósfera de la Tierra sobre un área*

espacio exterior.

perpendicular a los rayos del Sol; se expresa en términos de

Ley de Newton de enfriamiento. *La tasa de pérdida de calor*

potencia, 1.4 kW/m2.

de un objeto caliente es proporcional a la diferencia de

Potencia solar. *Energía por unidad de tiempo recibida del Sol.*

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S *(C O M P R E N S I Ó N)*
16.1 Conducción

17. Dado que todos los objetos emiten energía a sus alrede-

1. ¿Cuál es la función de los electrones "libres" en los con-

dores, ¿por qué las temperaturas de todos los objetos no

ductores de calor?

disminuyen de manera continua?

2. Si tocas los lados metálicos de un horno con la mano desnuda,

18. ¿Qué determina si un objeto es un absorbente neto o un

estarás en problemas. Pero mantén la mano brevemente en el

emisor neto de energía radiante en un momento dado?

aire del horno y estarás bien. ¿Qué te dice esto acerca de las

19. ¿Cuál por lo general se calienta más rápido: una cazuela

conductividades relativas del metal y el aire?

negra con agua fría o una cazuela plateada con agua fría?

3. Explica por qué alguien que camina sobre fuego puede andar

¿Cuál se enfriará más rápido?

rápidamente sin lastimarse sobre carbones al rojo vivo con los

20. ¿Un objeto puede ser tanto un buen absorbente como un

pies descalzos.

buen reflector al mismo tiempo? ¿Por qué sí o por qué no?

4. ¿Por qué los materiales como la madera, la piel, las plumas

21. ¿Por qué la pupila del ojo parece negra?

e incluso la nieve son buenos aislantes?

22. ¿Qué ocurre con la temperatura de algo que radia energía

5. ¿Un buen aislante impide que escape el calor o retrasa su paso?

sin absorber la misma cantidad a cambio?

16.2 Convección

23. Un objeto que radia energía durante la noche está en

6. ¿Qué ocurre con el volumen del aire a medida que asciende?

contacto con la Tierra relativamente caliente. ¿Cómo su

¿Qué ocurre con su temperatura?

mala conductividad afecta la temperatura del objeto en

relación con la temperatura del aire?

7. Cuando una molécula de aire es golpeada por una molé-

cula que se aproxima más rápidamente, ¿su rapidez de

16.4 Ley de Newton de enfriamiento

rebote aumenta o disminuye? ¿Y qué ocurre cuando gol-

24. ¿Cuál experimentará mayor tasa de enfriamiento: un atizador

pea una molécula en retroceso?

al rojo vivo en un horno caliente o un atizador al rojo vivo en

8. ¿Cómo se afectan las rapideces de las moléculas de aire

una habitación fría (o ambos se enfrían a la misma tasa)?

cuando el aire se comprime por la acción de una bomba

25. ¿La ley de enfriamiento de Newton se aplica tanto al

para neumáticos?

calentamiento como al enfriamiento?

9. ¿Cómo se afectan las rapideces de las moléculas de aire cuando

16.5 El efecto invernadero

se separan entre sí cuando escapan de la boquil a de un globo?

26. ¿Cuál sería la consecuencia de eliminar por completo el

10. ¿Por qué la mano de Mil ie no se quema cuando la sostiene

efecto invernadero?

arriba de la válvula de escape de la ol a de presión (Figura

16.7)?

27. ¿En qué forma el vidrio actúa como una válvula de una

vía para un invernadero convencional? ¿La atmósfera

11. ¿Por qué la dirección de los vientos costeros cambia del

actúa de igual modo como una válvula de una vía?

día a la noche?

16.6 Cambio climático

16.3 Radiación

28. Distingue entre tiempo y clima.

12. ¿En qué forma viaja la energía radiante?

13. Hablando relativamente, ¿las ondas de alta frecuencia tie-

nen longitudes de onda largas o cortas?

29. ¿Cuánta energía radiante proveniente del Sol, en prome-

14. ¿Cómo se relaciona la frecuencia pico de la energía radiante

dio, llega a cada metro cuadrado en lo alto de la atmósfe-

con la temperatura absoluta de la fuente de radiación?

ra de la Tierra cada segundo?

15. ¿Qué es radiación terrestre?

16.8 Cómo controlar la transferencia de calor

16. Cita una diferencia principal entre las ondas de la radia-

30. Cita tres formas en las que una botella Thermos inhibe la

ción solar y las ondas de la radiación terrestre.

transferencia de calor.

C A PÍ T U LO 16 R E V ISI Ó N

P I E N S A Y R E A L I Z A *(A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 31. Enrolla una hoja de*

32. Enciende y apaga rápidamente una lámpara incandescen-

Papel firmemente

papel en una gruesa

te común mientras colocas la mano a pocos centímetros

enrollado

barra de metal y colócala

de la bombilla. Sientes su calor pero, cuando tocas la

en una flama. Obser-

bombilla, no está caliente. Explica esto en términos de

va que el papel no se

Barra

energía radiante y de la transparencia de la bombilla.

enciende. ¿Puedes expli-

de hierro

33. Escribe una carta a la abuela y comparte con ella tu cono-

car esto en términos de

cimiento acerca de por qué la temperatura del aire es más

la conductividad de la

fría en las noches claras y más cálida en las noches nubo-

barra metálica? (Por lo

sas. Con ejemplos razonados, convéncela de que todas las

general, el papel no se encenderá hasta que su temperatu-

cosas emiten continuamente energía, y absorben energía.

ra alcance aproximadamente 2308C.)

S U S T I T U Y E Y L I S T O *(F A M I L I A R I Z A C I Ó N C O N E C U A C I O N E S)*

Cantidad de calor: Q *5* ***cm∆ T***

35. Calcula la cantidad de calor absorbida por 20 g de agua

34. Demuestra que, para aumentar la temperatura de 50 g de

que se calientan de 30 a 908C.

agua de 0 a 1008C, se necesitan 5,000 cal. La capacidad

calorífica específica del agua es 1 cal/g?8C.

A) 36. El decaimiento radiactivo del granito y otras rocas en el
interior de la Tierra proporciona suficiente energía para
mantener el interior fundido, para calentar lava y para
proporcionar calor a las fuentes termales naturales. Esto se
debe a la liberación promedio de aproximadamente 0.03 J
por kilogramo cada año. Demuestra que un aumento de
5008C en la temperatura para un trozo de granito térmi-
camente aislado tarda alrededor de 13.3 millones de años.
(Supón que la capacidad calorífica específica c del granito
es 800 J/kg?8C. Usa la ecuación Q = cm T.)
37. En una habitación a 258C, el café en un termo se enfría de
75 a 508C en 8 horas. Explica por qué tu predicción es que

sobre un día de 24 horas. Si en tu casa se necesita una po-
tencia promedio de 3 kW y puedes convertir potencia solar
en energía eléctrica con 10% de eficiencia, ¿cuán grande
será el área del colector que necesitarás para satisfacer todas
las necesidades de energía de tu casa con energía solar? (¿Un
colector cabrá en tu patio o en tu techo?)
39. En el laboratorio sumerges 100 g de clavos de hierro a
408C en 100 g de agua a 20C (el calor específico del
hierro es 0.11 cal/g?8C). a) Iguala el calor ganado por el
agua con el calor perdido por los clavos y demuestra que la
temperatura final del agua es de 228C. b) Tu compañero
de laboratorio se sorprende con el resultado y dice que,

su temperatura después de otras 8 horas será 37.5 8C.

dado que las masas del hierro y el agua son iguales, la tem-

38. En cierta ubicación, la potencia solar por unidad de área que

peratura final del agua debe estar cerca de 308C, a la mitad

l ega a la superficie de la Tierra es 200 W/m2, promediada

entre ellos. ¿Cuál es tu explicación?

P I E N S A Y E X P L I C A *(S Í N T E S I S)*

40. En un día frío, ¿por qué el pomo metálico de una puerta

47. Mucha gente se ha lastimado la lengua por lamer un trozo

se siente más frío que la puerta de madera?

de metal en un día muy frío. ¿Por qué no te lastimarías si

41. ¿Cuál es la explicación de que las camas de plumas sean

en el mismo día lames un trozo limpio de madera?

calientes?

48. Visita un cementerio

42. Enrolla un abrigo de piel alrededor de un termómetro.

cubierto de nieve y

MARY

¿Subirá su temperatura?

observa que la nieve

DOE

43. Si el aire a 708F se siente cálido y confortable, ¿por qué

no se acumula contra

R. I. P.

nadar en agua a 708F se siente frío?

las lápidas. Más bien,

forma depresiones,

44. ¿A qué temperatura común un bloque de madera y un

como se muestra. ¿Puedes pensar en una razón para esto?

bloque de metal se sentirán ambos ni calientes ni fríos al

tacto?

49. ¿Por qué los mitones son más calientes que los guantes en

un día frío?

45. Si sostienes un extremo de un trozo de metal contra un

trozo de hielo, el extremo en tu mano pronto se enfría.

50. La madera conduce muy mal el calor: tiene una conducti-

¿El frío fluye del hielo a tu mano? Explica.

vidad muy baja. ¿La madera todavía tiene conductividad

baja si está caliente? ¿Podrías agarrar rápidamente y con

46. La madera es un mejor aislante que el vidrio, aunque la

seguridad el mango de madera de una cazuela en un horno

fibra de vidrio se usa comúnmente como aislante en los

caliente con la mano desnuda? Aunque el mango de la ca-

edificios de madera. Explica.

zuela esté caliente, ¿se conduce mucho calor de él hacia tu

mano si lo sujetas brevemente? ¿Por qué sería mala idea

66. Si calientas un volumen de aire, éste se expande. ¿Entonces, si

hacer lo mismo con un mango de hierro? Explica.

expandes un volumen de aire, éste se calienta? Explica.

51. ¿La madera tiene una baja conductividad si está muy

67. Los ventiladores de techo pueden hacerte sentir más frío

caliente; esto es: en la etapa de carbones ardientes al rojo

en una habitación caliente. ¿Los ventiladores de techo

vivo? ¿Podrías caminar con seguridad por un lecho de

reducen la temperatura de la habitación?

carbones de madera al rojo vivo con los pies descalzos?

68. Para ahorrar energía, algunos ventiladores de techo son

Aunque los carbones estén calientes, ¿se conduce mucho

reversibles, de modo que dirigen el aire hacia abajo o lo

calor de ellos hacia tus pies si caminas rápidamente?

suben. ¿En qué dirección el ventilador debe llevar el aire

¿Podrías hacer lo mismo sobre carbones de hierro al rojo

durante el invierno? ¿En qué dirección durante el verano?

vivo? Explica. (Precaución: Los carbones pueden pegarse a

69. Una máquina de hacer nieve usada para las áreas de esquí

tus pies, así que, ¡Ay!, ¡no lo intentes!)

sopla una mezcla de aire comprimido y agua por una

52. ¿Es posible que el calor fluya entre dos objetos con la

boquil a. La temperatura de la mezcla inicialmente puede

misma energía interna? ¿El calor puede fluir de un objeto

estar muy por arriba de la temperatura de congelación del

con menos energía interna hacia uno con más energía

agua, aunque se forman cristales de nieve a medida que la

interna? Defiende tu respuesta.

mezcla se expulsa por la boquil a. Explica cómo ocurre esto.

53. Cuando dos tazas de chocolate caliente, una a 508C y la

70. ¿En cuál forma de transferencia de calor no se necesita un

otra a 608C, se vierten en un tazón, ¿por qué la tempera-

medio?

tura de la mezcla estará entre 50°C y 608C?

71. ¿Por qué un buen emisor de radiación térmica parece

54 ¿Por qué es incorrecto decir que, cuando un objeto caliente

negro a temperatura ambiente?

calienta un objeto frío, la temperatura fluye entre ellos?

72. Dado que todos los objetos radian energía, ¿por qué no

55. ¿Por qué es incorrecto decir que, cuando un objeto caliente

puedes verlos en la oscuridad?

calienta un objeto frío, el aumento de temperatura del obje-

73. Algunos cuerpos a diferentes temperaturas colocados en

to frío es igual a la disminución de temperatura del objeto

una habitación cerrada comparten energía radiante y a

caliente? ¿Cuándo es correcto este enunciado?

final de cuentas alcanzan una temperatura común. ¿Este

56. En una mezcla de gases hidrógeno y oxígeno a la misma
equilibrio térmico sería posible si los buenos absorbentes
temperatura, ¿cuáles moléculas se mueven más rápido?
fueran malos emisores y los malos absorbentes fueran
¿Por qué?
buenos emisores? Explica.
57. Un recipiente está lleno de gas argón y el otro de gas krip-
74. De acuerdo con las reglas de que un buen absorbente de
tón. Si ambos gases tienen la misma temperatura, ¿en cuál
radiación es un buen radiador y un buen reflector es un
recipiente los átomos se mueven más rápido? ¿Por qué?
mal absorbente, enuncia una regla que relacione las pro-
58. ¿Cuáles átomos, en promedio, se mueven más lento en
piedades de reflexión y de radiación de una superficie.
una mezcla, U-238 o U-235? ¿Cómo afectaría esto la
75. El calor de los volcanes y las fuentes termales naturales
difusión a través de una membrana porosa de gases, por
proviene de pequeñas cantidades de minerales radiacti-
lo demás idénticos, hechos de estos isótopos?
vos en la roca común del interior de la Tierra. ¿Por qué
59. El uranio sólido puede convertirse químicamente en
el mismo tipo de roca en la superficie de la Tierra no es
fluoruro de uranio, UF , que puede producir un vapor
caliente al tacto?

denso que se difunde a través de una barrera porosa.

76. Aun cuando el metal es un buen conductor, puede verse

¿Cuál es probable que se difunda a una mayor tasa, un

escarcha en los automóviles aparcados temprano en la

gas con isótopo U-235 o U-238?

mañana, inclusive cuando la temperatura del aire esté por

60. Piensa en dos habitaciones de igual tamaño conectadas

arriba de la congelación. Proporciona una explicación.

por una puerta abierta. Una habitación se mantiene a una

77. Cuando hay escarcha matutina en el pasto de un parque,

temperatura más alta que la otra. ¿Cuál habitación con-

¿por qué es poco probable encontrar escarcha en el suelo

tiene más moléculas de aire?

directamente debajo de las bancas del parque?

61. En una habitación apacible, el humo de una vela en ocasio-

78. ¿Por qué en ocasiones al vidrio de los invernaderos de los

nes se elevará sólo un poco, sin llegar al techo. Explica

floristas le ponen lechada de cal en el verano?

por qué.

79. En un día soleado muy frío, vistes un abrigo negro y

62. Los cubos de hielo flotan en un vaso de té helado. ¿Por

un abrigo de plástico transparente. ¿Cuál abrigo debes

qué el enfriamiento sería menor si los cubos estuvieran en

ponerte al último para un calentamiento máximo?

el fondo de la bebida?

80. Si la composición de la atmósfera superior cambiara de

63. Suelta una sola molécula en una región al vacío y caerá con

modo que permitiera el escape de una mayor cantidad de

la misma rapidez, y no de manera diferente, que caería una

radiación terrestre, ¿qué efecto tendría esto sobre el clima

pelota de béisbol soltada en la misma región. Explica.

de la Tierra?

64. Por lo general, la densidad del aire es menor arriba de cual-

81. ¿Por qué el aislamiento en un ático por lo general es más

quier punto en el aire que abajo, lo que proporciona una

grueso que el aislamiento en las paredes de una casa?

"ventana de migración" en al aire. ¿Cómo afecta esto el movi-

82. Elabora una pregunta de opción múltiple que compruebe

miento de las moléculas de rápido movimiento en el aire?

que tus compañeros de clase comprendieron la diferencia

65. ¿Qué tiene que ver el alto calor específico del agua con las

entre conducción y convección. Escribe otra pregunta en

corrientes de convección en el aire en la costa?

la que el término radiación sea la respuesta correcta.

***P I E N S A Y D I S C U T E** (E V A L U A C I Ó N)*

83. Discute el propósito de una capa de cobre o aluminio en

93. Si quieres ahorrar combustible y vas a salir de tu casa

el fondo de los artículos de cocina de acero inoxidable.

caliente durante media hora aproximadamente en un

84. Discute en términos físicos por qué los restaurantes sir-

día muy frío, ¿debes bajar el termostato algunos grados,

ven las papas al horno envueltas en papel aluminio.

apagarlo por completo o dejarlo que permanezca a la

85. Si te quedaras atrapado en un clima congelante sólo con

temperatura ambiente que deseas?

el calor de tu cuerpo como fuente, discute si estarías más

94. Si quieres ahorrar combustible y vas a salir de tu casa fría

caliente en un iglú ártico o en una choza de madera.

durante media hora aproximadamente en un día muy

86. Un amigo dice que las moléculas en una mezcla de gas

caliente, ¿debes subir el termostato de tu acondicionador

en equilibrio térmico tienen la misma energía cinética

de aire un poco, apagarlo por completo o dejarlo que

promedio. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo? Explica.

permanezca a la temperatura ambiente que deseas?

87. Tu amigo afirma que la rapidez promedio de todas las

95. A medida que más energía de combustibles fósiles y otros

moléculas de hidrógeno y nitrógeno en un gas es la

combustibles se libera en la Tierra, la temperatura global

misma. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo, y por qué?

del planeta tiende a aumentar. Analiza cómo el equi-

88. ¿Por qué no puedes esperar a que todas las moléculas de

librio de la temperatura explica por qué la temperatura

aire de tu habitación tengan la misma rapidez promedio?

de la Tierra no puede subir indefinidamente.

Relaciona tu discusión con masa y energía cinética.

96. Discute la función de una celda fotovoltaica. ¿Qué pro-

89. Las aves que ascienden y los pilotos de planeadores

duce a partir de qué?

pueden permanecer a flote durante horas sin gastar

97. Discute por qué un orificio de 1 ft2 en el techo, que

potencia. Discute por qué esto es así.

admite luz solar cuando el Sol está justo arriba, es como

90. ¿Por qué el helio liberado en la atmósfera termina por

tener una bombilla de 100 W en la habitación. Supón

desaparecer en el espacio?

que la atmósfera reduce la energía solar en la superficie

de la Tierra como 1.0 kW/m2.

91. ¿Es importante convertir temperaturas a la escala Kelvin

cuando se usa la ley de Newton de enfriamiento? Discute

98. Discute qué se entiende con el dicho “nunca puedes cam-

por qué sí o por qué no.

biar sólo una cosa”. Usa una ecuación matemática para

reforzar tu argumentación.

92. Supón que, en un restaurante, te sirven café antes de que estés listo para beberlo. Con la finalidad de que esté más caliente cuando lo vayas a tomar, ¿debes agregar crema al café justo ahora o esperar hasta que estés listo para beberlo?

99. ¿En qué forma la era industrial contribuyó al cambio climático? Discute mejores usos de los combustibles fósiles que la creación de calor y humo.

100. Discute la relación entre el crecimiento de la población humana y el cambio climático.

Water Freezer

17 ***1***

C A P Í T U L O 1 7

Cambio

de fase ***2***

17.1 Fases de la materia

17.2 Evaporación

17.3 Condensación

17.4 Ebullición

3

17.5 Fusión y congelación

17.6 Energía y cambios de fase

4

1 *Mi sobrino John Suchocki camina descalzo sin lastimarse sobre carbones calientes (¡con pasos rápidos!).* ***2*** *Dean Baird demuestra el rehielo, que se ilustra más adelante en la Figura 17.16.* ***3*** *Ron Hipschman en el Exploratorium retira un pedazo de hielo de la*

exposición del Congelador de Agua. Cuando se colocó agua a

temperatura ambiente en la cámara y se formó un vacío, la rápida evaporación enfrío el agua y la volvió hielo, como se investigará en la Figura 17.14. ***4*** *A falta de glándulas sudoríparas, los perros de Tammy jadean para enfriarse, acción en la que ocurre una evaporación tanto en la boca como en los bronquios.*

AeDean Baird le fascina enseñar física, y se nota. creado los manuales de laboratorio para todos los libros de Estableció y mantiene un programa de física con texto Hewitt. Fue nominado al California Department of gran matrícula en la Rio Americano High School Education's Assessment Review Panel. Un vistazo a su sitio en Sacramento, California. Sus alumnos disfrutan los labo-web, www.phyz.org, indica cuán ocupado puede estar un ratorios y simulaciones manuales y los auxiliados por compu- profesor, pero aun así se da tiempo para viajar y tomar foto- tadora, las demostraciones en las que grafías con calidad profesional (algunas de las cuales ador- participan y las animadas discusiones nan estas páginas). Dean ha sido reconocido en los niveles en clase. Siempre están a la espera del

local, estatal y nacional por su trabajo, y fue honrado por

YouTube Physics de Baird. Si bien sus

Barack Obama con un premio presidencial por excelencia

clases consisten en lanzar y atrapar en la enseñanza de las matemáticas y la ciencia. Dean tiene huevos crudos, compartir un choque

una pasión por hacer que los estudiantes se involucren en la

eléctrico, desacreditar a los camina-

física de distintas maneras, y siempre alienta el escepticismo

dores en fuego y criticar las caricatu-

y el pensamiento crítico.

ras del Correcaminos, sus estudiantes

A Dean le encanta la física térmica. Juega con calor

dominan la física tan bien que obtie-

y frío con un entusiasmo tal, que sus alumnos lo adoran

nen los niveles más altos en las evaluaciones estatales y en por eso. No puede hacer bolas de nieve en Sacramento, pero el examen de física AP. En su evento anual "ExploratoRio"

en el laboratorio puede demostrar el rehielo, como se mues -

(museo científico manual miniatura), Dean es el anfitrión de

tra en la segunda fotografía al comienzo del capítulo.

cientos de estudiantes locales de educación básica, ¡muchos de

Muestra cómo el alambre metálico pasa en forma lenta a

los cuales toman su clase unos ocho años después!

través del bloque de hielo y lo recongela a medida que avan-

Dean ha asesorado a profesores de física de la loca-

za, de modo que el hielo permanece intacto. En este capítu-

lidad, presentado tal eres para profesores a nivel estatal lo se abordan las fases de la materia y los cambios de energía y nacional, escrito artículos para The Physics Teacher y que ocurren siempre que se presenta un cambio de fase.

***17.1** Fases de la materia*

La materia a tu alrededor existe en cuatro fases (o estados) comunes. El hielo, por ejemplo, es la fase sólida del H O. Agrega energía y añades movimiento a la estructura molecular Cuando el agua se convierte en

2

rígida, que se rompe para formar H O en la fase líquida, agua. Agrega más energía y el gas, éste se llama vapor de agua.

2

líquido cambia a la fase gaseosa. Agrega todavía más energía y las moléculas se descomponen en iones y electrones, lo que genera la fase plasma. La fase de la materia depende de su temperatura y de la presión que se ejerce sobre ella. Los cambios de fase casi siempre necesitan una transferencia de energía.

***17.2** Evaporación*

El agua en una cacerola abierta con el tiempo se evaporará, o secará. El líquido que desaparece se convierte en vapor de agua en el aire. La ***evaporación*** *es el cambio de fase de líquido a gas que ocurre en la superficie de un líquido.*

La temperatura de cualquier sustancia se relaciona con la energía cinética promedio Casi 90% de la humedad atmos-de sus partículas. Las moléculas del agua líquida tienen una gran variedad de rapide-férica de la Tierra proviene de la

ces, se mueven en todas direcciones y rebotan unas contra otras. En cualquier momen-evaporación de sus océanos, lagos

to, algunas se mueven a muy altas rapideces en tanto que otras apenas se mueven. En y ríos. El resto proviene de la transpiración de las plantas.

el siguiente momento, las moléculas más lentas pueden volverse las más rápidas debido a colisiones moleculares. Algunas ganan energía cinética en tanto que otras la pierden.

Las moléculas de la superficie que ganan energía cinética mediante choques desde abajo pueden tener suficiente energía para liberarse del líquido. Pueden abandonar la superficie y escapar al espacio que está arriba del líquido. De esta forma, se convierten en moléculas de vapor.

La mayor energía cinética de las moléculas que rebotan tan fuerte que se liberan del líquido proviene de las moléculas que permanecen en el líquido. Ésta es la "física de

las bolas de billar": cuando las bolas rebotan unas con otras y algunas ganan energía cinética, otras pierden la misma cantidad de energía cinética. Las moléculas a punto de ser impulsadas fuera del líquido son las que ganan, en tanto que las que pierden energía permanecen en el líquido. Por tanto, la energía cinética promedio de las moléculas que permanecen en el líquido se reduce: la evaporación es un proceso de enfriamiento.

Es interesante que las moléculas rápidas que se liberan de la superficie sean frenadas a medida que se alejan debido a su atracción hacia la superficie.

De modo que, si bien el agua se enfría por la evaporación, el aire de arriba no se calienta de forma correspondiente con el proceso.

La cantimplora de la Figura 17.1 se mantiene fría debido a la evaporación que tiene lugar cuando la tela que cubre los lados se mantiene húmeda. A medida que las moléculas de agua de movimiento más rápido se liberan de la tela, la temperatura de la tela disminuye. La tela húmeda fría, a su vez, enfría la cantimplora metálica mediante conducción, lo que, a su vez, enfría el agua que está dentro. De modo que la energía se ***F I G U R A 1 7 . 1***

transfiere del agua que está dentro de la cantimplora al aire exterior. De esta forma, el Cuando está húmeda, la cubierta de tela

agua se enfría muy por debajo de la temperatura del aire exterior.

a los lados de la cantimplora favorece el

El efecto de enfriamiento de la evaporación es sorprendentemente evidente cuando enfriamiento.

aplicas un poco de alcohol a tu cuerpo. El alcohol se evapora muy rápidamente, lo que enfría la superficie del cuerpo con rapidez. Cuanto más rápida sea la evaporación, más rápido será el enfriamiento.

Cuando tu cuerpo se calienta en exceso, las glándulas sudoríparas producen transpiración. Esto es parte del termostato de la naturaleza, pues la evaporación de la transpiración enfría y ayuda a mantener una temperatura corporal estable. Muchos animales tienen muy pocas glándulas sudoríparas o ninguna en absoluto y deben enfriarse por otros medios (Figuras 17.2 y 17.3).

La tasa de evaporación es mayor a temperaturas más altas porque hay mayor proporción de moléculas que tienen energía cinética suficiente para escapar del líquido. El agua también se evapora a temperaturas más bajas, pero a una tasa más baja. Un charco de agua, por ejemplo, puede evaporarse con lentitud hasta quedar seco en un día frío.

Incluso el agua congelada se "evapora". Esta forma de evaporación, en la que las moléculas rebotan directamente de un sólido (hielo o nieve) a una fase gaseosa sin pasar por la fase líquida, se llama ***sublimación****. Puesto que las moléculas de agua están tan* ***F I G U R A 1 7 . 2***

firmemente sostenidas en la fase sólida, el agua congelada no se evapora (sublima) de Como tiene glándulas sudoríparas

manera tan fácil como el agua líquida. Sin embargo, la sublimación explica la pérdida sólo entre sus dedos, Sam jadea para

de porciones significativas de nieve y hielo, y es especialmente alta los días soleados en enfriarse.

climas secos.

FIGURA 17.3

Los cerdos, que no tienen glándulas

sudoríparas, se revuelcan en el lodo para

enfriarse.

(a)

(b)

(c)

(d)

FIGURA 17.4

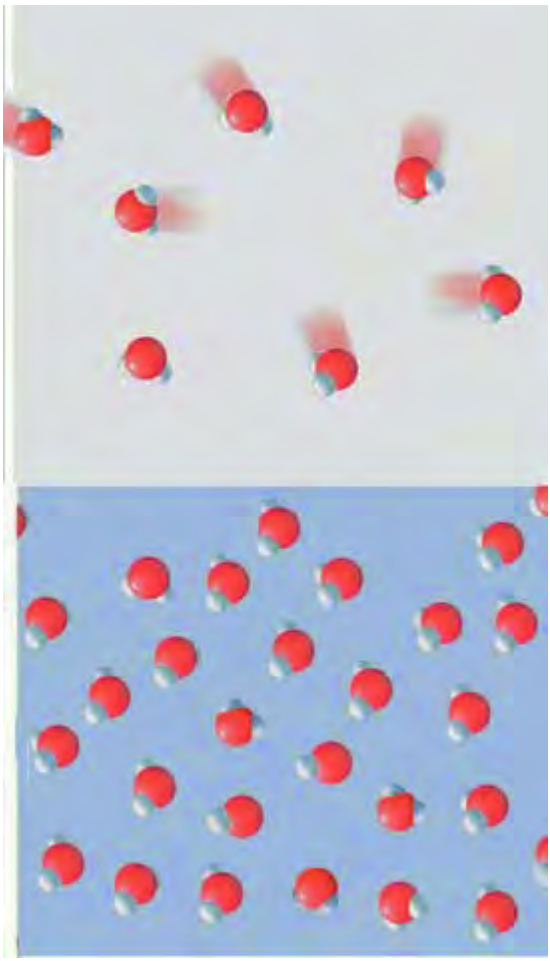
El pájaro bebedor de juguete funciona mediante la evaporación de un solvente (cloruro de metile-no) en el interior de su cuerpo y por la evaporación de agua de la superficie exterior de su cabeza.

La parte inferior del cuerpo contiene el solvente líquido, que se evapora con rapidez a temperatura Por la sublimación, los cubos de

ambiente. A medida que (a) se evapora, (b) aumenta la presión (flechas interiores), lo que empuja hielo que se dejan en un congela-el solvente hacia arriba del tubo. El solvente de la parte superior no se evapora porque la cabeza se dor durante mucho tiempo se

enfría mediante la evaporación del agua del pico y la cabeza cubiertos por fuera con fieltro. Cuan-vuelven más pequeños.

do el peso del solvente de la cabeza es suficiente, el pájaro (c) gira hacia adelante, lo que permite al solvente fluir de vuelta al cuerpo. En cada giro humedece la superficie de fieltro del pico y la cabeza, y (d) el ciclo se repite.



C A PÍ T U LO 17 C A M B I O D E FA SE

323

P U N T O D E C O N T R O L

¿La evaporación sería un proceso de enfriamiento si las moléculas de

cada rapidez tuvieran igual posibilidad de escapar de la superficie del líquido?

SCREENCAST: Evaporación

y condensación

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

No. Si las moléculas de todas las rapideces escaparan con igual facilidad de la superficie, las moléculas que quedaran atrás tendrían el mismo intervalo de rapideces que antes de que alguna escapara, y no habría un cambio en la temperatura del líquido.

Cuando sólo las moléculas más rápidas pueden escapar, las que permanecen son más lentas y el líquido se enfría más.

SCREENCAST: Lata que implota

y pájaro bebedor

***17.3** Condensación*

*Lo opuesto a la evaporación es la **condensación**: el cambio de gas a líquido. Cuando las moléculas de gas cerca de la superficie de un líquido son atraídas hacia el líquido, golpean Vapor de agua*

la superficie con creciente energía cinética y se vuelven parte del líquido. En las colisiones con moléculas de baja energía en el líquido, el exceso de energía cinética se comparte con el líquido, lo que aumenta la temperatura del líquido. La condensación es un proceso de calentamiento.

Un ejemplo sorprendente del calentamiento que ocasiona la condensación es la energía liberada por el vapor cuando se condensa: una experiencia dolorosa si se condensa sobre ti. Es por eso que una quemadura con vapor es mucho más dañina que una quemadura con agua hirviendo a la misma temperatura; el vapor libera mucha energía cuando se condensa a líquido y moja la piel. Esta liberación de energía por condensación se utiliza en los sistemas de calefacción por vapor.

Evaporación

Condensación

El vapor es vapor de agua a alta temperatura, por lo general a 100C o más. El vapor de agua más frío también libera energía cuando se condensa. Cuando tomas una ducha, por ejemplo, te calientas por la condensación

del vapor en el espacio de la ducha —incluso el vapor de una ducha fría—, si permaneces en el área húmeda de la ducha. De inmediato sientes la diferencia cuando sales de ella. Lejos de la humedad, la evaporación neta tiene lugar rápidamente y sientes frío. Pero si permaneces en el espacio de la ducha, incluso con el agua cerrada, el efecto de calentamiento de la condensación contrarresta Agua líquida

el efecto de enfriamiento de la evaporación. Si se condensa tanta humedad como la que se evapora, no sientes cambio en la temperatura corporal. Si la condensación supera la ***F I G U R A 17. 5***

evaporación, te calientas. Si la evaporación supera la condensación, te enfrías. Así que Intercambio de moléculas en la interfaz ahora sabes por qué puedes secarte con una toalla mucho más cómodamente si per- entre el agua líquida y gaseosa.

maneces en el espacio de la ducha. Para secarte por completo, puedes terminar la tarea en un área menos húmeda.

Pasa una tarde de julio en los secos Tucson o

Phoenix, donde la evaporación es mucho mayor

que la condensación. El resultado de esta evapora-

ción pronunciada es una sensación mucho más fría

de la que experimentarías en una tarde de julio, a la

misma temperatura, en la ciudad de Nueva York o

en Nueva Orleans. En estas ubicaciones húmedas,

la condensación contrarresta de manera conside-

rable la evaporación y sientes el efecto de calenta-

miento a medida que el vapor en el aire se condensa

en tu piel. Literalmente eres bombardeado por el

F I G U R A 1 7 . 7

Si sientes frío fuera del espacio de la

impacto de las moléculas de H O en el aire que te

2

FIGURA 17.6

ducha, regresa a su interior y te calen-

golpean. Dicho más suavemente: te calientas por El vapor libera energía interna cuan-tarás por la condensación del exceso de

la condensación del vapor en el aire sobre tu piel.

do se condensa dentro del "radiador".

vapor de agua.

PUNTO DE CONTROL

Si el nivel del agua en un plato de agua no cambia de un día al

siguiente,

¿puedes concluir que no ocurrió evaporación ni condensación?

VIDEO: La condensación es

un proceso de calentamiento

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

No del todo, pues a nivel molecular está teniendo lugar mucha actividad. Evaporación y condensación ocurren de manera continua. Que el nivel del agua sea constante simplemente indica proporciones iguales de ambas, no que nada ocurrió. Cuando se evapora el mismo número de moléculas que se condensan, no ocurre evaporación ni condensación neta. Los dos procesos se cancelan entre sí.

Condensación en la atmósfera

Siempre hay un poco de vapor de agua en el aire. Una medida de la cantidad de este vapor de agua es la humedad (masa de agua por volumen de aire). En los informes del clima con frecuencia se utiliza el término humedad relativa: la razón entre la cantidad de vapor de agua que hay actualmente en el aire a una temperatura dada y la cantidad máxima de vapor de agua que puede contener el aire a dicha temperatura.1

El aire que contiene tanto vapor como pueda está saturado. La saturación sucede cuando la temperatura del aire baja y las moléculas de vapor de agua en el aire comienzan a condensarse. Las moléculas de agua tienden a pegarse. Sin embargo, debido a sus rapideces promedio usualmente altas en el aire, casi ninguna molécula de agua se

¿La humedad te hace sentir más

queda unida cuando chocan. Más bien, estas moléculas de movimiento rápido rebotan calor, más frío, o ambos? Si ya

de vuelta cuando chocan y, por tanto, permanecen en la fase gaseosa. Sin embargo, tienes frío, más humedad te hace

algunas moléculas de agua se mueven más lentamente que el promedio, y esas molécu-sentir más frío. Si ya tienes calor,

las lentas tienen más probabilidad de quedar pegadas unas con otras en una colisión más humedad te hace sentir más

(Figura 17.8). (Para entender esto, piensa en una mosca que roza un papel

matamoscas calor. A temperaturas agradables,

un poco de humedad te hace sentir

pegajoso. A alta rapidez, la mosca tiene suficiente cantidad de movimiento y energía más cómodo.

para rebotar del papel matamoscas hacia el aire sin quedar pegada, pero a baja rapidez es más probable que quede pegada.) De modo que las moléculas de agua con movimiento lento son las que tienen más probabilidad de condensarse y formar gotas de agua en el aire saturado. Puesto que las temperaturas del aire más bajas se caracterizan por moléculas con un movimiento más lento, es más probable que ocurran saturación y condensación en aire frío que en aire caliente. Es posible que el aire caliente contenga más vapor de agua que el aire frío.

F I G U R A 1 7 . 8

Condensación del vapor de agua.

Las moléculas de H2O con movimiento rápido rebotan en la colisión

Las moléculas de H2O con movimiento lento se unen en la colisión

1La humedad relativa es un buen indicador de comodidad. Para la mayoría de las personas, las condiciones son ideales cuando la temperatura es de aproximadamente 20C y la humedad relativa está entre 50 y 60%.

Cuando la humedad relativa es mayor, el aire húmedo se siente "bochornoso" pues la condensación contrarresta la evaporación de la transpiración.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Por qué se forma rocío sobre una lata de gaseosa fría?

Por lo general, las nubes son más

densas que el aire. Así que, ¿por

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

qué las nubes no caen del cielo?

La respuesta es: ¡las nubes sí caen!

El vapor de agua en el aire caliente se enfría cuando hace contacto con la lata fría.

Una nube estable cae tan rápido

¿Cuál es el destino de las moléculas de agua enfriadas? Son más lentas cuando como se mueve el flujo de aire

chocan y se quedan pegadas. Esto es condensación, que es la razón por la que la ascendente que está debajo de

superficie de una lata fría está húmeda.

ella, de modo que permanece esta-

cionaria. Si la nube cae de todas

maneras, se le llama niebla.

La niebla y las nubes

El aire caliente sube. A medida que sube, se expande. A medida que se expande, se enfría. A medida que el aire se enfría, las moléculas de vapor de agua, que son muy pequeñas para ser visibles, se frenan. Las colisiones moleculares a menor rapidez resultan en moléculas de agua que se quedan pegadas. Las moléculas de agua se combinan con pequeñas partículas de polvo, sal y humo en el aire para formar gotas de nube que crecen y se convierten en nubes. Si dichas partículas no están presentes, es posible estimular la formación de nubes si se "siembran" en el aire las partículas o los iones adecuados.

Las brisas calientes soplan sobre el océano y se convierten en humedad. Cuando el aire húmedo se mueve de aguas más cálidas a más frías o de

agua caliente a tierra fría, se enfría. A medida que se enfría, las moléculas de vapor de agua comienzan a unirse en lugar de rebotar unas con otras. La condensación sucede cerca del nivel del suelo y ***F I G U R A 17. 9***

¿Por qué es común que las nubes se for-

se tiene niebla. La diferencia entre la niebla y una nube es básicamente la altitud. La men donde hay corrientes ascendentes niebla es una nube que se forma cerca del suelo. Volar a través de una nube es muy de aire húmedo caliente?

parecido a conducir a través de niebla. Consulta en internet para aprender acerca de los diferentes tipos de niebla.

17.4 *Ebullición*

En las condiciones correctas, la evaporación puede tener lugar por debajo de la superficie de un líquido, lo que forma burbujas de vapor que flotan hacia la superficie, donde escapan. Este cambio de fase a través de un líquido en lugar de sólo en la superficie se llama ***ebullición****. Las burbujas en el líquido pueden formarse sólo cuando la Es común decir que se hierve el*

presión del vapor en el interior de las burbujas es tan grande que resiste la presión del agua, dando a entender con esto

líquido circundante. Si la presión del vapor no es lo suficientemente grande, la presión que se le aplica calor. En realidad,

circundante colapsará cualquier burbuja que tienda a formarse. A temperaturas por de-el proceso de ebullición enfría el

bajo del punto de ebullición, la presión del vapor en las burbujas no es tan grande, agua.

de modo que no se formarán burbujas sino hasta que se alcance el punto de ebullición.

A esta temperatura (100C para el agua a presión atmosférica) las moléculas son suficientemente energéticas para ejercer una presión de vapor tan grande como la presión del agua circundante (que se debe sobre todo a presión atmosférica).

F I G U R A 1 7 . 1 0

El movimiento de las moléculas

de vapor de agua en la burbuja de Fuerzas debidas a la

vapor (muy agrandada) crea una

presión combinada

presión de gas (llamada presión de de la atmósfera y

vapor) que contrarresta la presión

el agua

atmosférica y la del agua contra la

burbuja.

FIGURA 17.11

Si la presión aumenta, las moléculas del vapor deben moverse más rápido para ejercer La tapa hermética de una olla de presión suficiente presión y evitar que la burbuja colapse. Es posible proporcionar presión adi-mantiene el vapor de agua presurizado arriba de la superficie del agua, lo que

cional ya sea al ir más profundo bajo la superficie del líquido (como en los géiseres) o al inhibe la ebullición. Por tanto, el agua aumentar la presión del aire sobre la superficie del líquido, que es como funciona una olla hierve a una temperatura mayor que de presión. Ésta tiene una tapa de ajuste hermético que no permite el escape del vapor 100C.

PA R T E T RES

C A LO R

hasta que alcanza cierta presión mayor que la presión normal del aire. A medida que se acumula vapor de evaporación en el interior de la olla de presión sellada, la presión sobre la superficie del líquido aumenta, lo que al principio impide la ebullición. Las burbujas En la cima de montañas con una

que en condiciones normales se formarían son destrozadas. El calentamiento continuo altitud de 4,500 m (15,000 pies), ¡un

aumenta la temperatura por encima de 100C. No hay ebullición sino hasta que la pre-montañista puede dar un sorbo a

una taza de té hirviendo sin peligro

sión de vapor en el interior de las burbujas supera la presión aumentada sobre el agua.

alguno de quemarse la boca!

El punto de ebullición se eleva. Por el contrario, la presión reducida (como a grandes altitudes) disminuye el punto de ebullición del líquido. De este modo, se observa que la ebullición depende no sólo de la temperatura, sino también de la presión.

A grandes altitudes, el agua hierve a una temperatura más baja. Por ejemplo, en Nivel del suelo

Denver, Colorado, la ciudad que tiene el apodo de Mile-High City (ciudad de una milla 93°C

de altura), el agua hierve a 95C en lugar de a la temperatura de ebullición de 100C

característica del nivel del mar. Si intentas cocinar comida en agua hirviendo de una 103˚C

temperatura más baja, debes esperar más tiempo para la cocción adecuada. Un huevo hervido de 3 minutos en Denver es asqueroso. Si la temperatura del agua en ebullición es muy baja, la comida no se cocerá en absoluto. Es importante señalar que es la alta 113˚C

temperatura del agua la que cuece los alimentos, no el proceso de ebullición en sí.

Géiseres

123˚C

Un géiser es una ol a de presión natural que hace erupción de manera periódica. Consiste en un largo y estrecho agujero vertical en el que se filtran corrientes subterráneas (Figura 17.12). La columna de agua se calienta por el calor volcánico inferior a temperaturas que superan los 100C. Esto puede ocurrir porque la columna vertical relativamente profunda 133˚C

del agua ejerce presión sobre el agua más profunda, lo que aumenta el punto de ebul ición.

La estrechez del tiro evita corrientes de convección, lo que permite que las porciones más ***F I G U R A 1 7 . 1 2***

profundas se calienten mucho más que la superficie del agua. El agua en la superficie Un géiser del tipo Viejo Fiel.

está a menos de 100C, pero la temperatura del agua de abajo, donde se calienta, está a más de 100C, suficientemente alta para permitir la ebul ición antes de que el agua en la parte superior alcance el punto de ebul ición. Por tanto, la ebul ición comienza cerca del fondo, donde las burbujas ascendentes empujan hacia arriba la columna de agua sobre Energía que sale

el as, y comienza la erupción. A medida que el agua sale a borbotones, la presión so -

del agua

bre el agua restante se reduce. Entonces hierve con rapidez y hace erupción con gran fuer-

(enfriamiento)

za. Cuando la erupción termina, la fisura se llena con agua nueva y el ciclo se repite.

Energía

La ebullición es un proceso de enfriamiento

100°C

que entra

La evaporación es un proceso de enfriamiento. También lo es la ebullición. A primera en el agua

vista, esto puede parecer sorprendente, tal vez porque suele asociarse la ebullición con (calentamiento)

el calentamiento. Pero una cosa es calentar agua y otra es la ebullición. Cuando hierve agua a 100C a presión atmosférica, su temperatura permanece constante. Esto signiF I G U R A 1 7 . 1 3

El calentamiento sube la temperatura

fica que se enfría tan rápido como se calienta. ¿Mediante qué mecanismo? Mediante la del agua y la ebullición la enfría.

ebullición. Si el enfriamiento no tuviera lugar, la entrada continua de energía en una cacerola con agua hirviendo ocasionaría un aumento continuo de temperatura. Como se dijo, la razón por la que una olla de presión alcanza temperaturas más altas es porque evita la ebullición normal, lo que, en efecto, evita el enfriamiento.

VIDEO: La ebullición es un

proceso de enfriamiento

P U N T O D E C O N T R O L

Dado que la ebullición es un proceso de enfriamiento, ¿sería buena idea que metieras tus manos calurosas y sudorosas en agua en ebullición para enfriarlas?

Los montañistas pioneros del

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

siglo XIX, sin altímetros, usaban el

¡No, no, no! Cuando se dice que la ebullición es un proceso de enfriamiento, se entien-punto de ebullición del agua para

de que el agua (¡no tus manos!) es la que se enfría en relación con la temperatura determinar sus altitudes.

más alta que alcanzaría de otro modo. Debido al enfriamiento, permanece a 100C en lugar de calentarse más. ¡Un chapuzón en agua a 100C te haría gritar un enorme ay!

C A PÍ T U LO 17 C A M B I O D E FA SE

327

Ebullición y congelación al mismo tiempo

Por lo general, el agua hierve por la aplicación de calor. Pero también se puede hervir Vacío

agua mediante la reducción de presión. Se puede demostrar de manera sorprendente el Agua

efecto de enfriamiento de la evaporación y la ebullición si se coloca agua a temperatura ambiente en un frasco al vacío (Figura 17.14). Si la presión dentro del frasco se reduce Aislante

en forma lenta con una bomba de vacío, el agua comenzará a hervir. El proceso de ebullición elimina calor del agua que queda en el plato, que se enfría hasta una temperatura más baja. A medida que la presión se reduce aún más, más y más moléculas tienen rapidez suficiente para convertirse

en vapor. La ebullición continua resulta en Hacia bomba de vacío

una reducción de temperatura hasta que se alcanza el punto de congelación de aproximadamente 0

F I G U R A 1 7 . 1 4

C. El enfriamiento continuo mediante ebullición produce la formación Aparato que demuestra que el agua se de hielo sobre la superficie del agua que burbujea. ¡Ebullición y congelación tienen congela y hierve al mismo tiempo en lugar al mismo tiempo! Hay que verlo para poder apreciarlo. Las burbujas congeladas un vacío. Un gramo o dos de agua se de agua en ebullición son un espectáculo extraordinario.2

coloca en un plato que se aísla de la

Si rocías unas gotas de café en una cámara de vacío, también hervirán hasta la base mediante una taza de espuma de congelación. Incluso después de congeladas, las moléculas de agua continuarán evapo- estireno.

rándose en el vacío hasta que queden pequeños cristales de café sólidos. Así es como se hace el café soluble (liofilizado). La baja temperatura de este proceso tiende a evitar el cambio en la estructura química de los sólidos de café. Cuando se agrega agua caliente, se restaura gran parte del sabor original del café. ¡La ebullición es en realidad un proceso de enfriamiento!

***17.5** Fusión y congelación*

Supón que sostienes las manos de alguien y ambos comienzan a saltar al azar. Cuanto más violento salten, más difícil será mantener unidas las manos. Si saltaran con suficiente violencia, mantener unidas las manos sería imposible. Algo así le sucede a las moléculas de un sólido cuando se calienta. A medida que se absorbe calor, las moléculas vibran cada vez con más violencia en forma menos ordenada. Si se absorbe ***VIDEO: Olla de presión y***

congelación al mismo tiempo

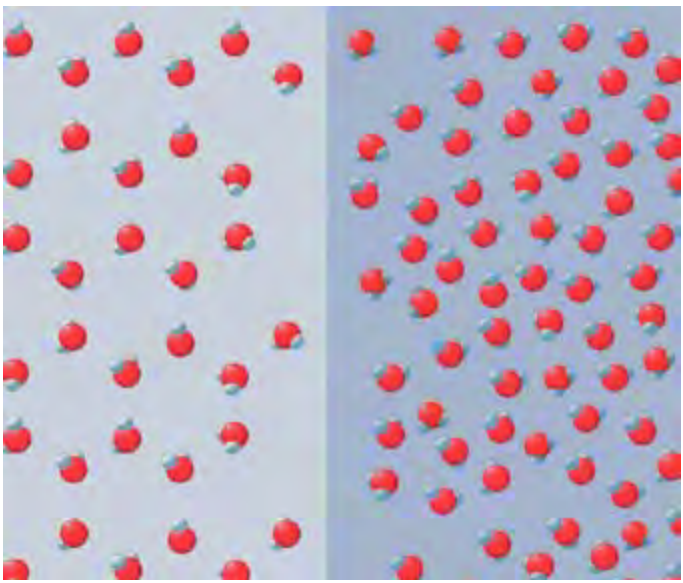
suficiente calor, las fuerzas de atracción entre las moléculas ya no podrán mantenerlas juntas. El sólido se funde.

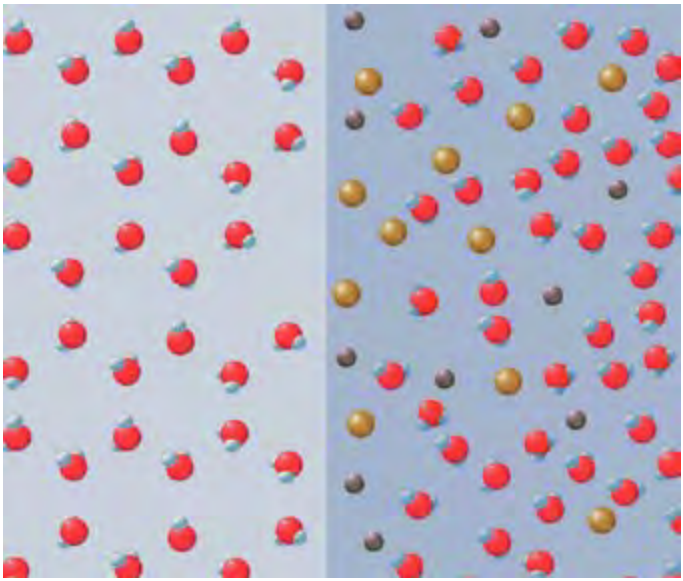
La congelación es el inverso de este proceso. Las sustancias se congelan exactamente a la misma temperatura a la que se funden. A medida que se extrae energía de un líquido, el movimiento molecular disminuye hasta que al final las moléculas, en promedio, se mueven con suficiente lentitud como

para que las fuerzas de atracción entre ellas puedan causar cohesión. Entonces las moléculas vibran en torno a posiciones fijas y forman un sólido.

Una sustancia pura tiene un punto de fusión o congelación definido a cualquier presión dada. La adición de cualquier impureza bajará esta temperatura. Por tanto, el punto de congelación o fusión sirve de indicador de la pureza de una sustancia. Por ejemplo, a presión atmosférica, el agua se congela a 0C, a menos que tenga disueltas sustancias como azúcar o sal. Si es así, el punto de congelación es más bajo. En el caso de sal en agua, los iones cloro captan electrones de los átomos de hidrógeno en H2O e impiden la formación de cristales. El resultado de esta interferencia de iones "ajenos" es que se necesita un movimiento más lento para la formación de las estructuras hexagonales de los cristales de hielo. A medida que se forman los cristales de hielo, la interferencia se intensifica porque aumenta la proporción de moléculas o iones "ajenos" entre las moléculas de agua no fundidas. Las conexiones se vuelven cada vez más difíciles. La congelación puede completarse sólo cuando las moléculas de agua se mueven con la lentitud suficiente para que las fuerzas de atracción tengan una participación inusualmente importante en el proceso. El hielo que se forma primero casi siempre es H2O pura.

2"El congelador de agua" es mi presentación favorita del Exploratorium de San Francisco. Se coloca agua a temperatura ambiente en una cámara de vacío donde hierve de manera rápida y se convierte en hielo. La exposición se muestra en la tercera fotografía del inicio de este capítulo.





F I G U R A 1 7 . 1 5

(a) En una mezcla de hielo y agua líquida a 08C, el número de moléculas que entran en la fase sólida es igual al número de las que entran en la fase líquida. (b) Si se añade sal, disminuye el número de moléculas que entran en la fase sólida debido al número menor de moléculas líquidas en la interfaz.

(a)

Hielo

Agua líquida

(b)

Hielo

Solución acuosa de NaCl

Rehielo

Puesto que las moléculas de H2O forman estructuras abiertas en la fase sólida, la aplicación de presión puede hacer que el hielo se funda. Los cristales simplemente se machacan a la fase líquida. (La temperatura del punto de fusión sólo baja un poco, en 0.007C por cada atmósfera adicional de presión agregada.) Cuando la presión se elimina, las moléculas se cristalizan y ocurre de nuevo el congelamiento. Este fenómeno de fusión bajo presión y nueva congelación cuando la presión se reduce se llama ***rehielo****. Es una de las propiedades del agua que la distinguen de otros materiales.*

El rehielo se ilustra muy bien en la Figura 17.16 (y en la segunda fotografía del inicio de este capítulo). Un alambre muy delgado de cobre con pesos suspendidos en sus extremos cuelga sobre un bloque de hielo.3 El alambre atravesará en forma lenta el hielo, pero ***F I G U R A 1 7 . 1 6***

su rastro quedará lleno con hielo. De modo que el alambre y los pesos caerán al suelo, y Rehielo. El alambre pasa de manera

gradual a través del bloque de hielo sin

dejarán el hielo como un bloque sólido.

cortarlo a la mitad.

Hacer bolas de nieve es un buen ejemplo de rehielo. Cuando comprimes la nieve con las manos, produces una ligera fusión de los cristales de hielo; cuando retiras la presión, ocurre rehielo y mantiene unida la nieve. Hacer bolas de nieve es difícil en un clima muy frío porque la presión que puedes aplicar no es suficiente como para fundir la nieve.

17.6 *Energía y cambios de fase*

Si agregas calor de manera continua a un sólido o a un líquido, el sólido o el líquido a la larga cambiarán de fase. El sólido se licuará y el líquido se evaporará. Tanto para la licuefacción de un sólido como para la evaporación de un líquido se necesita una entrada de energía. Por el contrario, debe extraerse energía de una sustancia para cambiar su fase en la dirección de gas a líquido a sólido (Figura 17.17).

FIGURA 17.17

Se absorbe energía cuando el cambio

Cambios de energía con cambios de fase.

de fase es en esta dirección

Sólido

Líquido

Gas

Se libera energía cuando el cambio

de fase es en esta dirección

En el ciclo de enfriamiento de un refrigerador se utilizan muy bien los conceptos que se muestran en la Figura 17.17. Un refrigerador es una ***bomba térmica*** *que "bombea"*

calor de un ambiente frío a uno caliente. Esto se logra mediante un líquido que tiene 3Los cambios de fase ocurren cuando el hielo se funde y el agua se vuelve a congelar. Para estos cambios se necesita energía. Cuando el agua que está encima del alambre vuelve a congelarse, cede energía. ¿Cuánta? Suficiente para fundir una cantidad igual de hielo inmediatamente debajo del alambre. Esta energía debe conducirse por el grosor del alambre. Por tanto, esta demostración exige que el alambre sea un excelente conductor de calor.

Una cuerda, por ejemplo, no servirá.

un punto de ebullición bajo, el refrigerante, que se bombea al interior de la unidad enfriadora, donde se convierte en gas. Cuando el cambio de fase es de líquido a gas, se extrae calor del interior donde están los alimentos. El gas, con su energía agregada, se dirige afuera, hacia bobinas de condensación. En las bobinas, el calor se libera hacia el Un refrigerador es una bomba

aire exterior a medida que el gas se condensa de nuevo a la fase líquida. La siguiente vez térmica. Transfiere calor desde un

ambiente frío y hacia un ambien-

que estés cerca de un refrigerador, coloca la mano cerca de las bobinas condensadoras te caliente. Un acondicionador

en la parte trasera, o en el fondo, y sentirás el aire que se calentó por la energía extraída de aire también es una bomba

del interior.

térmica, con el ambiente "frío" en

Cada vez con más frecuencia se utilizan bombas térmicas de varios diseños para el interior de la casa y el ambiente

calentar (y enfriar) las casas. Por lo general, utilizan menos energía que el combustible

“caliente” en el exterior de la casa.

En ambos casos, el dispositivo fun-

fósil para calentar una casa. Las bombas térmicas funcionan como un refrigerador es-ciona con energía externa.

tándar. Mientras que un refrigerador inevitablemente calienta la habitación al retirar calor del alimento que hay en su interior y depositarlo en sus bobinas de condensación, las bombas térmicas calientan la habitación de manera deliberada. En lugar de extraer calor de los alimentos, pueden extraer calor del agua que se bombea desde tuberías subterráneas cercanas.4 El agua subterránea es relativamente caliente. Las temperaturas del subsuelo dependen de la latitud. En el medio oeste y las planicies centrales de Estados Unidos, la temperatura del subsuelo a una profundidad de un metro es de alrededor de 13

SCREENCAST: Energía de los

C (55F) todo el año, más caliente que el aire en el invierno. Las tuberías subte-cambios de fase

rráneas que están fuera de la casa transportan agua a 13C hacia una bomba térmica en el interior de la casa. Entonces el refrigerante evaporado se bombea hacia las bobinas de condensación, donde se condensa y cede calor para calentar la casa. El agua fría regresa al suelo exterior, donde se calienta a temperatura del suelo y el ciclo se repite.

En verano, el proceso puede invertirse y convertir la bomba térmica en un enfriador. Un acondicionador de aire es en sí una bomba térmica. Si se aplican los mismos principios, simplemente bombea energía térmica del interior más frío de una casa al ***SCREENCAST: Más sobre***

los cambios de fase

exterior más caliente en un día de verano. En una ciudad muy poblada, el efecto de miles de acondicionadores de aire en funcionamiento al mismo tiempo puede ser un pequeño aumento de la temperatura exterior.

De este modo, se ve que un sólido debe absorber energía para fundirse y un

líquido debe absorber energía para evaporarse. Por el contrario, un gas debe liberar energía para licuarse y un líquido debe liberar energía para solidificarse.

P U N T O D E C O N T R O L

Cuando se condensa H O en la fase de vapor, ¿el aire circundante se calien-2

ta o enfría?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

El cambio de fase es de vapor a líquido, lo que libera energía (Figura 17.17), de modo que el aire circundante se calienta. Consulta en la Figura 17.8 otra forma de ver esto.

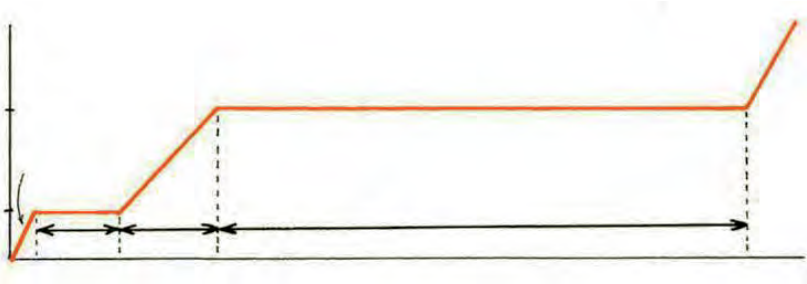
Las moléculas de H O que se condensan del aire son las más lentas. Retirarlas aumen-2

ta la energía cinética promedio de las moléculas restantes, de ahí el calentamiento.

Esto va de la mano con el enfriamiento del agua cuando se evaporan las moléculas con movimiento más rápido, donde las que permanecen en la fase líquida tienen una energía cinética promedio más baja.

Observa, en particular, los cambios de fase que ocurren en H O. Para simplificar 2

los números, piensa en un trozo de hielo de 1 g a una temperatura de −50C en un recipiente cerrado que se coloca sobre una estufa para calentarse. Un termómetro en 4Dependiendo de la cantidad de calor necesaria, por lo general se colocan de 200 a 500 m de tubería en el exterior de la casa, en tramos de aproximadamente 1.0 a 1.8 m bajo la superficie del suelo. La configuración de la tubería puede ser de bucles horizontales o de formas en U verticales que lleguen a más profundidad.



330

PA R T E T RES

C A LO R

Evaporación

100°

Vapor

Hielo

Fusión

Agua

0°

Temperatura en °C

80 cal

100 cal

540 cal

–50°

(335 J)

(419 J)

(2,260 J)

Calor

F I G U R A 1 7 . 1 8

Gráfica que muestra la energía involucrada en el calentamiento y los cambios de fase de 1 g de H O.

2

el recipiente revela un aumento lento de temperatura hasta 0C. Luego sucede algo sorprendente. La temperatura permanece en 0C aun cuando continúe la entrada de El calor de fusión es la energía

calor. En lugar de calentarse más, el hielo comienza a fundirse. Para fundir todo el necesaria para separar molécu-gramo de hielo, éste absorbe 80 calorías (335 joules) de energía, lo que no aumenta las de la fase sólida o también la

su temperatura ni siquiera una fracción de grado. Sólo cuando todo el hielo se funde, energía liberada cuando se forman

cada caloría adicional (4.19 joules) absorbida por el agua aumenta su temperatura los enlaces en un líquido que lo

cambian a la fase sólida.

en 1C hasta que alcanza la temperatura de ebullición, 100C. De nuevo, a medida que se agrega energía, la temperatura permanece constante mientras más del gramo de agua hierve y se convierte en vapor. El agua debe absorber 540 calorías (2,260

joules) de energía térmica para evaporar todo el gramo. Por último, cuando toda el agua se convierte en vapor a 100C, la temperatura comienza a aumentar una vez más. Continúa aumentando en tanto se agregue energía. Este proceso se ilustra en la Figura 17.18.

Las 540 calorías (2,260 joules) necesarias para evaporar un gramo de agua equivalen a una gran cantidad de energía, mucha más de la que se necesita para transfor-El calor de evaporación del agua

es enorme. La energía necesaria

mar un gramo de hielo a cero absoluto hasta agua en ebullición a 100C. Aunque para evaporar una cantidad de

las moléculas en el vapor y el agua en ebullición a 1008C tienen la misma energía agua en ebullición es casi siete

cinética promedio, el vapor tiene más energía potencial porque las

moléculas están veces la energía necesaria para

relativamente libres unas de otras y no están ligadas como en la fase líquida. El vapor fundir la misma cantidad de hielo.

contiene una gran cantidad de energía que puede liberarse durante la condensación.

Puedes ver que las energías necesarias para fundir hielo (80 calorías, o 335 joules, por gramo) y para hervir agua (540 calorías, o 2,260 joules, por gramo) son las mismas que las cantidades liberadas cuando los cambios de fase son en la dirección opuesta. Los procesos son reversibles. La cantidad de energía que se necesita para cambiar una unidad de masa de cualquier sustancia de sólido a líquido (y viceversa) se llama ***calor latente de fusión*** *de la sustancia. (La palabra latente recuerda que ésta es energía térmica oculta al termómetro.) En el caso del agua, ya viste que éste es de El calor de vaporización es la*

energía necesaria para separar las

80 calorías por gramo (335 joules por gramo). La cantidad de energía necesaria para moléculas de la fase líquida o tam-cambiar cualquier sustancia de líquido a gas (y viceversa) se llama ***calor latente de*** *bién la energía liberada cuando el*

vaporización *de la sustancia. Para el agua, éste son unas monumentales 540 calorías gas se condensa a la fase líquida.*

por gramo (2,260 joules por gramo).5 También sucede que estos valores relativamente altos se deben a las fuerzas poderosas entre las moléculas del agua: enlaces hidrógeno.

El gran valor de 540 calorías por gramo para el calor latente de vaporización del agua explica por qué, bajo algunas condiciones, el agua caliente se congelará más 5En unidades del SI, el calor de vaporización del agua se expresa como 2.260 megajoules por kilogramo (MJ/kg), y el calor de fusión del agua es 0.335 MJ/kg.

rápido que el agua tibia.6 Este fenómeno se vuelve evidente cuando una delgada capa de agua se distribuye sobre una gran área, como cuando lavas un automóvil con agua caliente en un frío día invernal o mojas una pista de patinaje con agua caliente, lo que funde y suaviza las manchas rugosas y vuelve a congelarse con rapidez. La tasa de enfriamiento mediante evaporación rápida es muy alta porque cada gramo de agua en evaporación extrae al menos 540 calorías del agua que queda detrás. Ésta es una cantidad enorme de energía comparada con 1 caloría por grado Celsius que se extrae ***F I G U R A 17.19***

de cada gramo de agua que se enfría por conducción térmica. La evaporación verdade- En un día frío, el agua caliente puede ramente es un proceso de enfriamiento.

congelarse más rápido que el agua tibia

por la energía que sale del agua caliente

durante la evaporación rápida.

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Cuánta energía se transfiere cuando 1 g de vapor a 100C se

condensa a agua a 100C?

2. ¿Cuánta energía se transfiere cuando 1 g de agua hirviendo a 100C se enfría a agua de hielo a 0C?

3. ¿Cuánta energía se transfiere cuando 1 g de agua de hielo a 0C se congela a hielo a 0C?

4. ¿Cuánta energía se transfiere cuando 1 g de vapor a 100C se convierte en hielo a 0C?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Un gramo de vapor a 100C transfiere 540 calorías de energía cuando se condensa para convertirse en agua a la misma temperatura.*

2. *Un gramo de agua hirviendo transfiere 100 calorías cuando se enfría 100C para convertirse en agua de hielo.*

3. *Un gramo de agua de hielo a 0C transfiere 80 calorías para convertirse en hielo a 0C.*

4. *Un gramo de vapor a 100C transfiere a los alrededores un gran total de los valores anteriores, 720 calorías, para convertirse en hielo a 0C.*

No te atreves a tocar con el dedo seco una sartén caliente sobre una estufa caliente, pero sin duda puedes hacerlo sin daño si primero te mojas el dedo y tocas la sartén muy brevemente. Incluso puedes tocarla varias veces seguidas en tanto tu dedo permanezca húmedo. Esto se debe a que la energía que de ordinario iría a quemarte el dedo se ***F I G U R A 17. 2 0***

emplea en cambiar la fase de la humedad en tu dedo. La energía convierte la humedad Para probar qué tan caliente está el en vapor, que entonces proporciona una capa de aislamiento entre tu dedo y la sartén. plomo fundido, Paul Ryan arrastra el dedo mojado por él.

De igual modo, puedes juzgar lo caliente de una plancha si la tocas muy brevemente con el dedo mojado.

El ex supervisor Paul Ryan, del Departamento de Obras Públicas de Malden, Massachusetts, hace años usó plomo fundido para sellar tuberías en ciertas operaciones de plomería. Sorprendía a los mirones cuando arrastraba el dedo por el plomo fundido para juzgar su calor (Figura 17.20). Se aseguraba de que el plomo estuviera muy caliente y que su dedo estuviera totalmente húmedo antes de hacerlo. (No lo intentes por tu cuenta; si el plomo no está suficientemente caliente, ¡se te pegará al dedo y

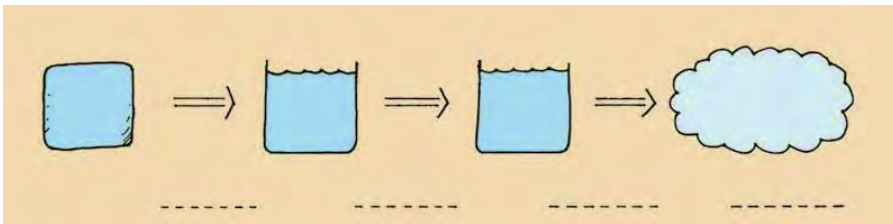
podrías sufrir una grave quemadura!) De igual modo, quienes caminan descalzos sobre fuego de carbones al rojo vivo con frecuencia prefieren los pies húmedos (otros, como Dave Willey en la Figura 17.21, prefieren los pies secos, pues afirman que los carbones calientes se pegan con más facilidad a los pies húmedos, ¡AY!). Sin embargo, la baja conductividad de los carbones de madera (como se estudió en el Capítulo 16) es la principal razón por la que no se queman los pies de quienes caminan descalzos sobre el fuego.

F I G U R A 1 7 . 2 1

6El agua en ebullición no se congelará antes que el agua fría, pero se congelará antes que el agua moderadamente El profesor Dave Willey camina descal-caliente. Por ejemplo, el agua en ebullición se congelará antes que el agua que esté a una temperatura de más de zo sobre carbones de madera al rojo vivo

unos 60C, pero no antes que el agua con una temperatura menor que 60C. Inténtalo y observa.

sin quemarse.



PA R T E T RES

C A LO R

PRACTICANDO LA FÍSICA

Escribe el número de calorías o joules de cada paso para el cambio de fase de 1 g de hielo a 0C a vapor a 100C.

Aumento de

Cambio

Cambio

temperatura

de fase

de fase

1 gramo

1 gramo

1 gramo

1 gramo

de vapor

de hielo

de agua

de agua

a 100°C

0°C

a 0°C

a 100°C

Calor

necesario =

+

+

=

P U N T O D E C O N T R O L

Supón que 4 g de agua hirviendo se vierten sobre una superficie fría y que 1 g se evapora rápidamente. Si la evaporación toma 540 calorías de los restantes 3 g de agua y no tiene lugar otra transferencia de calor, ¿cuál será la temperatura de los restantes 3 g?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Los restantes 3 g se convertirán en hielo a 0C. 540 calorías de 3 g significa que cada gramo cede 180 calorías. 100 calorías de un gramo de agua hirviendo reducen su temperatura a 0C y retirar 80 calorías más lo convierten en hielo. Es por esto que el agua caliente se convierte rápido en hielo en un ambiente congelante. (En la práctica, debido a otra transferencia de calor, se necesitaría más de 1 g de los 4 g originales para evaporar y congelar el resto.)

R E S U M E N D E T É R M I N O S *(C O N O C I M I E N T O)*
Evaporación. *El cambio de fase de líquido a gaseoso.*

Bomba térmica. *Dispositivo que transfiere calor, lo quita de un*
Sublimación. *El cambio de fase de sólido a gaseoso, sin pasar ambiente frío y lo coloca en un ambiente caliente.*

por la fase líquida.

Calor latente de fusión. *Cantidad de energía necesaria para*

Condensación. *El cambio de fase de gaseoso a líquido.*

cambiar una unidad de masa de una sustancia de sólido a

Ebullición. *Rápida evaporación que tiene lugar dentro de un*

líquido (y liberada en el proceso inverso).

líquido, así como en su superficie.

Calor latente de vaporización. *Cantidad de energía necesaria* ***Rehielo.*** *Proceso de fusión bajo presión y la posterior*

para cambiar una unidad de masa de una sustancia de

congelación cuando se elimina la presión.

líquido a gas (y liberada en el proceso inverso).

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S *(C O M P R E N S I Ó N)*
17.1 Fases de la materia

17.3 Condensación

1. ¿Cuáles son las cuatro fases comunes de la materia?

6. Distingue entre condensación y evaporación.

17.2 Evaporación

7. ¿Por qué una quemadura con vapor es más dañina que una

quemadura con agua hirviendo a la misma temperatura?

2. ¿Las moléculas de un líquido tienen todas aproximadamente

la misma rapidez, o tienen una gran variedad de rapideces?

8. ¿Por qué te sientes incómodamente caliente en un día

caluroso y húmedo?

3. ¿Qué es la evaporación?

9. Distingue entre humedad y humedad relativa.

4. ¿Por qué la evaporación es un proceso de enfriamiento?

10. ¿Por qué el vapor de agua en el aire se condensa cuando el

5. ¿Qué es la sublimación?

aire es frío?

C A PÍ T U LO 17 R E V ISI Ó N

333

11. ¿Por qué el aire húmedo caliente forma nubes cuando

22. ¿Por qué disminuir la temperatura de un líquido hace que

se eleva?

se congele?

12. ¿Cuál es la diferencia básica entre una nube y la niebla?

23. ¿Por qué el agua no se congela a 0C cuando están

presentes iones ajenos?

17.4 Ebullición

24. ¿Qué ocurre con la estructura hexagonal abierta del hielo

13. Distingue entre evaporación y ebullición.

cuando se le aplica suficiente presión?

14. ¿El aumento de presión atmosférica incrementa o

25. ¿Por qué un alambre no simplemente corta en dos un

disminuye el punto de ebullición del agua?

bloque de hielo cuando lo atraviesa?

15. En una olla de presión, ¿qué cuece más rápido los alimen-

tos: la ebullición del agua o la mayor temperatura del agua?

17.6 Energía y cambios de fase

16. ¿Por qué el agua en el fondo de un géiser no hervirá cuan-

26. ¿Un líquido libera energía o absorbe energía cuando

do esté a 100

cambia a gas?

C?

27. ¿Un líquido libera energía o absorbe energía cuando

17. ¿Qué ocurre con la presión del agua en el fondo de un

cambia a sólido?

géiser cuando parte del agua superior sale a borbotones?

28. El calor que se descarga en las bobinas de condensación

18. ¿Por qué la energía añadida al agua en ebullición no

después de la bomba de compresión de un refrigerador,

aumenta la temperatura del agua?

¿tiene que ver con vaporización o condensación del

19. ¿Cuándo hervirá el agua a una temperatura menor a 100C?

líquido refrigerante?

20. ¿Qué evidencia puedes citar en cuanto a la afirmación de

29. ¿Cuántas calorías se necesitan para cambiar la temperatu-

que el agua puede hervir a una temperatura de 0C?

ra de 1 g de agua en 1C? ¿Para fundir 1 g de hielo a 08C?

17.5 Fusión y congelación

¿Para evaporar 1 g de agua en ebullición a 100C?

30. Cita dos razones por las que quienes caminan sobre fuego

21. ¿Por qué aumentar la temperatura de un sólido hace que

no se queman los pies húmedos cuando caminan descal-

se funda?

zos sobre carbones al rojo vivo.

P I E N S A Y R E A L I Z A *(A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 31. Coloca un embudo Pyrex boca abajo en una sartén llena de*

calienta, en la parte inferior de la cacerola

agua de modo que el tubo estrecho del embudo sobresalga

fría se forman gotas y se combinan hasta

del agua. Apoya una parte del embudo sobre un clavo o

que son tan grandes que caen, lo que

una moneda de tal manera que el agua pueda entrar bajo él.

produce una “lluvia” estable conforme el

Coloca la sartén sobre una estufa y observa el agua cuando

agua que está abajo se calienta suavemen-

comienza a hervir. ¿Dónde se forman primero las burbujas?

te. ¿En qué se parece esto a la manera en que se produce la

¿Por qué? A medida que las burbujas suben, se expanden con

lluvia natural y en qué difiere?

rapidez y empujan agua fuera de el as. El

34. Mide la temperatura del agua hirviendo y la temperatura

embudo confina el agua, que es forzada a

de una solución en ebullición de sal y agua. ¿Cuál es la

subir por el tubo y salir por la parte supe-

diferencia?

rior. ¿Ahora sabes cómo funcionan un géiser

35. Haz como Dean Baird demuestra en

y una cafetera percoladora?

la fotografía 2 al inicio del capítulo,

32. Observa el pico de una tetera con agua hirviendo. Observa

o como muestra el siguiente dibujo, y

que no puedes ver el vapor que sale del pico. La nube que

suspende un peso pesado con un alam-

ves más lejos del pico no es vapor, sino gotas de agua con-

bre de cobre sobre un cubo de hielo. En

densadas. Ahora sostén la llama de una vela en la nube de

cuestión de minutos, el alambre atravesará el hielo. El hielo

vapor condensado. ¿Puedes explicar lo que observas?

se fundirá bajo el alambre y volverá a congelarse sobre él,

33. Puedes producir lluvia en tu cocina. Coloca una taza

lo que dejará una trayectoria visible si el hielo es transparente.

de agua en una sartén Pyrex o una cafetera de vidrio y

36. Escribe una carta a la abuela y explícale por qué llevar el

caliéntala en forma lenta sobre una flama baja. Cuando el

agua a la ebullición cuando ella prepara té en realidad es

agua esté caliente, coloca una cacerola llena con cubos de

un proceso que enfría el agua. Explica cómo podría con-

hielo encima del recipiente. Conforme el agua de abajo se

vencer a sus amigas del té sobre este concepto intrigante.

P I E N S A Y R E S U E L V E *(A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) La cantidad de calor con cambio de temperatura es Q = cmΔ T.*

fase, la cantidad de calor Q que cambia la fase de una masa

Para un cambio de fase del agua es Q = mL, donde L es el calor m es Q 5 mL, donde L es el calor de fusión o calor de vapo-f

de fusión, 80 cal/g, y L es el calor de vaporización, 540 cal/g.

rización de la sustancia. Por ejemplo, para H O, el calor de

v

2

fusión es 80 cal/g (u 80 kcal/kg) y el calor de vaporización

37. La cantidad de calor Q que cambia la temperatura D T de es 540 cal/g (o 540 kcal/kg). Usa estas relaciones para

una masa m de sustancia está dada por Q 5 cm D T, donde determinar el

número de calorías para cambiar (a) 1 kg de

c es la capacidad calorífica específica de la sustancia. Por

hielo a 0C en agua de hielo a 08C, (b) 1 kg de agua

ejemplo, para H2O, c 5 1 cal/g?8C. Y para un cambio de

de hielo a 08C en 1 kg de agua en ebullición a 1008C,

(c) 1 kg de agua en ebul ición a 1008C en 1 kg de vapor a

42. Si sueltas un trozo de hielo sobre una superficie dura, la

1008C, y (d) 1 kg de hielo a 08C en 1 kg de vapor a 1008C.

energía del impacto fundirá parte del hielo. Cuanto más

38. La capacidad calorífica específica del hielo es de unos

alto se suelte, más hielo se fundirá con el impacto. Demues-

0.5 cal/g?C, y supón que permanece en dicho valor todo el

tra que, para fundir en su totalidad un bloque de hielo que

tiempo hasta el cero absoluto. Calcula el número de calorías

cae sin arrastre aerodinámico, lo ideal es soltarlo de una

que tomaría cambiar un cubo de hielo de 1 g a cero absoluto

altura de 34 km. [Sugerencia: iguala los joules de energía

(2273C) en 1 g de agua en ebul ición. ¿Cómo se compara

potencial gravitacional con el producto de la masa de hielo

este número de calorías con el número de calorías necesarias

y su calor de fusión (en unidades del SI, 335,000 J/kg). ¿Ves

para cambiar el mismo gramo de agua en ebul ición a 100C

por qué la respuesta no depende de la masa?]

en vapor a 100C?

43. Una bola de 10 kg de hierro se suelta sobre el pavimento

39. Encuentra la masa de hielo a 0C que fundirían comple-

desde una altura de 100 m. Si la mitad del calor generado

tamente 10 g de vapor a 100C.

se destina a calentar la bola, encuentra el aumento de

40. Considera 50 g de agua caliente a 80C vertida en una cavi-

temperatura de la bola. (En unidades del SI, la capacidad

dad de un bloque de hielo muy grande a 0C. ¿Cuál será la

calorífica específica del hierro es 450 J/kg?8C.) ¿Por qué

temperatura final del agua en la cavidad? Demuestra que

la respuesta es la misma para una bola de cualquier masa?

deben fundirse 50 g de hielo para enfriar el agua caliente

44. El calor de vaporización del alcohol etílico es de cerca de

hasta esta temperatura.

200 cal/g. Si se permitiera la evaporación de 2 kg de este

41. Un trozo de 50 g de hierro a 80C se suelta en una cavi-

fluido en un refrigerador, demuestra que se formarían 5 kg

dad de un bloque de hielo muy grande a 0C. Demuestra

de hielo con agua a 0C.

que se fundirán 5.5 g de hielo. (La capacidad calorífica

específica del hierro es 0.11 cal/g?C.)

PIENSA Y CLASIFICA *(ANÁLISIS)*

45. Clasifica las temperaturas del agua en ebullición, de

46. De mayor a menor, clasifica las energías necesarias para

mayor a menor, en estas ubicaciones:

estos cambios de fase para iguales cantidades de H2O:

a. Death Valley,

a. De hielo a agua de hielo.

b. nivel del mar,

b. De agua de hielo a agua hirviendo.

c. Denver, CO (la "ciudad de una milla de altura").

c. De agua hirviendo a vapor.

PIENSA Y EXPLICA *(SÍNTESIS)*

47. Cuando sales de una alberca en un día caliente y seco en

59. Tú sabes que las ventanas en tu casa caliente se humede-

el suroeste, sientes mucho frío. ¿Por qué?

cen en un día frío. ¿Pero puede formarse humedad en las

48. ¿Por qué el sudor es un mecanismo eficiente para

ventanas si el interior de tu casa es frío en un día caluro-

enfriarte en un día caluroso?

so? ¿Cuál es la diferencia?

49. ¿Por qué soplar sobre la sopa caliente la enfría?

60. En los días helados, con frecuencia se forma escarcha en

50. ¿Qué sucede con la temperatura de una cacerola con agua

las ventanas. ¿Por qué, por lo general, hay más escarcha

cuando la evaporación excede la condensación?

en las porciones inferiores de las ventanas?

51. ¿Cuál es la fuente de energía que mantiene en operación

61. ¿Por qué a menudo se forman nubes sobre los picos de las

al pájaro bebedor de la Figura 17.4?

montañas? (Sugerencia: considera las corrientes ascendentes.) 52. Un inventor afirma haber desarrollado un nuevo perfume

62. ¿Por qué tienden a formarse nubes arriba de una isla plana

que dura mucho tiempo porque no se evapora. Comenta

o una montañosa en medio del océano? (Sugerencia: com-

acerca de esta afirmación.

para la capacidad calorífica específica de la tierra con la del

53. ¿Un ventilador eléctrico común enfría el aire en una habi-

agua y las posteriores corrientes de convección en el aire.)

tación? Si no es así, ¿entonces por qué se usa en una habita-

63. Una gran cantidad de vapor de agua cambia de fase para

ción extremadamente caliente?

convertirse en agua en las nubes que forman una tormen-

54. ¿Por qué si enrollas una botella en una tela húmeda en

ta. ¿Este proceso libera energía térmica o la absorbe?

un día de campo se enfría más que si colocas la botella

64. ¿Por qué la temperatura del agua en ebullición permanece

en una cubeta con agua fría?

igual en tanto el calentamiento y la ebullición continúen?

55. El cuerpo humano puede mantener su temperatura habi-

65. ¿Por qué las burbujas de vapor en una cacerola de agua

tual de 378C en un día cuando la temperatura esté por

hirviendo aumentan de tamaño a medida que se elevan

arriba de 408C. ¿Cómo sucede esto?

en el agua?

56. Las ventanas de panel doble tienen gas nitrógeno o aire

66. ¿Por qué la temperatura de ebullición del agua disminuye

muy seco entre los paneles. ¿Por qué el aire ordinario es

cuando el agua está bajo presión reducida, como cuando

una mala idea?

está a una mayor altitud?

57. ¿Por qué los icebergs con frecuencia están rodeados de niebla?

67. Coloca un frasco con agua sobre un pequeño soporte

58. ¿Cómo la Figura 17.8 ayuda a explicar la humedad que

dentro de una sartén de agua, de modo que el fondo del

se forma dentro de las ventanas de un automóvil cuando

frasco se mantenga arriba del fondo de la sartén. Cuando

estás estacionado con tu novia en una noche fría?

la sartén se coloque sobre una estufa, el agua de la sartén

hervirá, pero no el agua del frasco. ¿Por qué?

68. Los respiraderos hidrotérmicos son aberturas en el suelo

82. ¿Cómo se compara el punto de congelación de un líquido

marino que descargan agua muy caliente. El agua que

con su punto de fusión?

sale casi a 280C de uno de tales respiradores en la costa

83. Las personas que viven donde las nevadas son comunes te

de Oregon, a unos 2,400 m bajo la superficie, no está en

dirán que las temperaturas del aire son más altas cuando

ebullición. Ofrece una explicación.

nieva que cuando está claro. Algunos malinterpretan esto

69. El agua hervirá en forma espontánea en un vacío. . en la

y dicen que la nevada no puede ocurrir en días muy fríos.

superficie de la Luna, por ejemplo. ¿Podrías cocinar un

Explica esta mala interpretación.

huevo en esta agua en ebullición? Explica.

84. ¿Cómo podría desalinizarse el agua mediante congelación?

70. Tu amigo inventor propone un diseño de utensilios de

85. ¿Qué produce el lado inferior húmedo de un glaciar, que

cocina que permitan la ebul ición a una temperatura menor

le permite deslizarse desde regiones elevadas?

que 100C, de modo que los alimentos puedan cocerse con

86. ¿El rehielo ocurriría si los cristales de hielo no tuvieran

menor consumo de energía. Comenta acerca de esta idea.

una estructura abierta? Explica.

71. ¿Qué puede salir mal si agarras el mango de una sartén

87. Un trozo de metal y una masa igual de madera se retiran de

caliente con un trapo delgado de cocina húmedo?

un horno caliente a la misma temperatura y se sueltan sobre

72. ¿Cómo puede hervir el agua sin calentarla?

bloques de hielo. El metal tiene una capacidad calorífica

73. Si el agua que hierve debido a una presión reducida no

específica más baja que la madera. ¿Cuál fundirá más hielo

está caliente, ¿entonces el hielo formado por la presión

antes de enfriarse a 08C?

reducida no está frío? Explica.

88. ¿Cómo es que fundir hielo cambia la temperatura del aire

74. Tu profesor te entrega un frasco cerrado, lleno parcialmente

circundante?

con agua a temperatura ambiente. Cuando lo sostienes, la

89. Cuando entras en una cabaña de esquí caliente en un día

transferencia de calor entre tus manos desnudas y el frasco hace

frío, tus gafas se empañan. ¿Por qué ocurre esto?

que el agua hierva. ¡Muy impresionante! ¿Cómo se logró esto?

90. ¿Qué explican los extremos abultados de una lata de

75. Cuando hierves papas, ¿el tiempo de cocción se reducirá

gaseosa que se congela?

con agua que hierve vigorosamente en lugar de con agua

91. ¿Por qué el ponche de frutas medio congelado siempre es

que hierve moderadamente? (Las instrucciones para cocinar

más dulce que el ponche de frutas completamente derretido?

espagueti te piden que el agua esté hirviendo vigorosamente,

92. ¿Es condensación o vaporización lo que ocurre en las bobinas

no para reducir el tiempo de cocción sino para evitar algo

externas calientes de un acondicionador de aire en operación?

más. Si no sabes de lo que se trata, pregunta a un cocinero.)

93. Algunas personas mayores descubrieron que, cuando

76. ¿Por qué colocar una tapa sobre una cacerola con agua

enrollaban papel alrededor del hielo en sus neveras, evita-

sobre una estufa acorta el tiempo para que el agua hierva,

ban la fusión. Discute lo aconsejable de esta práctica.

en tanto que, después de que el agua hierve, el uso de una

tapa sólo acorta un poco el tiempo de cocción?

94. Cuando se funde el hielo en un estanque, ¿qué efecto

tiene esto sobre la temperatura del aire cercano?

77. En la planta eléctrica de un submarino nuclear, la tempe-

ratura del agua en el reactor es mayor que 100

95. ¿Por qué una tina con agua colocada en el sótano de

C. ¿Cómo

es posible esto?

productos enlatados de una granja ayuda a evitar que la

comida enlatada se congele en los inviernos fríos?

78. Explica por qué las erupciones de muchos géiseres se repi-

ten con notable regularidad.

96. ¿Por qué rociar los árboles frutales con agua antes de una helada ayuda a proteger la fruta de la congelación?

79. ¿Por qué el agua del radiador de un automóvil en ocasiones hierve en forma explosiva cuando se quita la tapa del

97. ¿Cómo es que los dispositivos que calientan las casas en el radiador?

invierno también pueden usarse para enfriar las casas en verano?

80. ¿El hielo puede ser más frío que 0C? ¿Cuál es la temperatura de una mezcla de agua y hielo?

98. ¿Por qué jadea un perro acalorado?

81. ¿Por qué el hielo muy frío es "pegajoso"?

99. Elabora una pregunta de opción múltiple sobre los cambios de energía en la evaporación y la condensación.

***PIENSA Y DISCUTE** (EVALUACIÓN)*

100. El alcohol se evapora más rápido que el agua a la misma

bolsas se cuelgan en el exterior de un automóvil en rápi-

temperatura. Discute cuál produce más enfriamiento: el

do movimiento, el agua en su interior se enfría mucho.

alcohol o la misma cantidad de agua sobre tu piel.

105. ¿Cuándo puedes agregar calor a algo sin aumentar su

101. Tú puedes determinar la dirección del viento si humede-

temperatura?

ces tu dedo y lo sostienes alto en el aire. Discute por qué.

106. ¿Cuándo puedes agregar calor al hielo sin fundirlo?

102. Hay más de una razón por la que verter una taza de café

107. ¿Cuándo puedes extraer calor de algo sin bajar su

caliente en una cacerola resulta en un enfriamiento más

temperatura?

rápido. Analiza dos razones.

108. Analiza por qué el agua puede salir de respiraderos subma-

103. Supón que todas las moléculas de un líquido tienen la

rinos profundos a temperaturas de unos 300C sin hervir.

misma rapidez, no rapideces aleatorias. ¿La evaporación

109. Discute cuál es el gas predominante en una burbuja de

de este líquido causaría el enfriamiento del líquido res-

agua hirviendo.

tante? Discute.

110. Las unidades de aire acondicionado no contienen agua,

104. En los climas calurosos, los viajeros usan bolsas de lona

aunque es común ver agua gotear cuando operan en un

porosas llenas de agua. Analiza por qué, cuando las

día caluroso. Discute.

Fysik & laser show
Naturvetenskaplig Fysik
Lunds universitet
Q8
Oils

18 ***1***

CAPÍTULO 18

2

Termodinámica

18.1 Termodinámica

3

18.2 El cero absoluto

18.3 La primera ley de la termodinámica

18.4 Procesos adiabáticos

18.5 La meteorología y la primera ley

18.6 La segunda ley de la termodinámica

18.7 La energía tiende a dispersarse

18.8 Entropía

4

1 *Después de hervir un poco de agua en una lata de un galón y luego sellar la lata cuando el vapor de agua ha sacado la mayor parte del aire, Dan Johnson y sus alumnos observan la lata estrujarse*

lentamente. Él motiva a sus estudiantes a discutir cómo la conden-

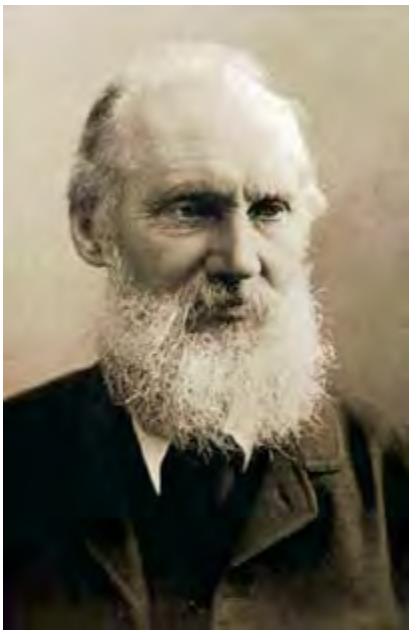
sación y la presión atmosférica explican este fenómeno. ***2*** *A una escala mayor, P. O. Zetterberg utiliza una bomba de vacío para*

reducir la presión del aire dentro de un tambo de petróleo 50 veces

más grande. ***3*** *Barbara y Tomas Brage ayudan conforme la pre-*

sión atmosférica sobre el exterior hace su trabajo, ¡para beneplácito de la clase! ***4*** *Ole Anton Haugland sostiene una lata "vacía" boca abajo. Aage Mellem coloca una flama en su abertura, que calienta y*

expande el aire en su interior, lo que a su vez infla el globo morado; ajá: tal como ocurre en el funcionamiento de un globo aerostático.



C A PÍ T U LO 18 T ER M O D I N Á M I C A

337

Lord Kelvin, por quien se le dio el nombre a la escala Morse entre Europa y América del Norte. Por este éxito, de temperatura Kelvin, publicó más de 600 artículos

fue nombrado cabal ero. El gobierno británico expresó aún

científicos y registró un total de 70 patentes. Comen-

más su reconocimiento en 1892 y nombró barón a Thom-

zó como Wil iam Thomson, nacido en 1824 en Belfast, son. Desde entonces fue lord Kelvin, y tomó su título del Irlanda. Educado al principio

por su padre, el joven Thom-río Kelvin, que corría a través de su finca en Glasgow.

son comenzó a estudiar en la división infantil de la University

Kelvin hizo una estimación de la edad de la Tierra, un

of Glasgow a los 10 años de edad, después de que su padre se

tema controvertido en la época. Para comenzar sus cálculos

mudó a dicha ciudad escocesa. supuso que la temperatura original de la Tierra era la tem-Publicó su primer ensayo acadé-

peratura del Sol. A partir de mediciones de tasas de enfria-

mico cuando tenía 16 años de miento en roca calculó el tiempo que tardaría en enfriarse un edad. Después de terminar sus cuerpo del tamaño de la Tierra. Estimó la edad de la Tierra estudios en Glasgow, se mudó en aproximadamente 100 mil ones de años. Lo que Kelvin a la University of Cambridge y

desconocía en la época era el fenómeno de radiactividad y su

se graduó con honores en 1845,

importancia para mantener caliente el interior de la Tierra.

a los 21 años de edad. Al año

Incluso los científicos más admirables cometen errores y

siguiente era profesor titular de

algunos, peor todavía, los defienden con evidencia que los

filosofía natural en la Univer-

contradice. Kelvin defendió tozudamente su cálculo de 100

sity of Glasgow. No hay duda: mil ones de años a lo largo de su vida y refutó las conclusiones Wil iam Thomson era un genio.

de Darwin acerca de la evolución como imposibles en el

Entre las materias que estudió Thomson está el calor, periodo de 100 mil ones de años. También dijo que las y en 1847 definió la escala de

temperatura absoluta, a la

aeronaves más pesadas que el aire serían imposibles. En 1900

que después se le puso su nombre. También fue un fuerte

afirmó: "No hay nada nuevo por descubrir en física ahora.

defensor del sistema métrico de medición. Y en 1856 fue el

Todo lo que resta son mediciones cada vez más precisas". A

primero en introducir el término energía cinética. Introdujo

pesar de estas serias opiniones erróneas en sus últimos años,

el teléfono Bell en Bretaña y ayudó a planificar el primer

sus logros en ciencia e ingeniería fueron enormes. Cuando

cable trasatlántico, diseñó un medidor eléctrico sensible murió en 1907, fue enterrado junto a Isaac Newton en la que condujo a la transmisión rápida de señales en código

Abadía de Westminster.

***18.1** Termodinámica*

*Kelvin fue el primero en acuñar la palabra **termodinámica** (que surge de las palabras griegas que significan "movimiento de calor"). La ciencia de la termodinámica surgió a comienzos del siglo XIX, antes de comprender la teoría atómica y molecular de la materia. Debido a que las primeras personas que trabajaron en la termodinámica sólo tenían vagas nociones de los átomos y no sabían nada de los electrones ni otras partículas mi-*
SCREENCAST: Termodinámica

croscópicas, los modelos que usaron invocaron nociones macroscópicas (como trabajo mecánico, presión y temperatura) y sus funciones en las transformaciones de energía.

Las dos piedras angulares de la termodinámica son la conservación de la energía y el hecho de que el calor fluye de manera espontánea de caliente a frío y no del modo contrario. La termodinámica proporciona la teoría básica de las máquinas térmicas, desde las turbinas de vapor hasta los reactores nucleares, y la teoría básica de los refrigeradores y las bombas térmicas. Las leyes de la termodinámica arremetieron contra los sueños de inventores e industriales que creían en la posibilidad de una máquina de

movimiento perpetuo: un dispositivo que, al recibir una entrada inicial de energía, siguiera funcionando de manera indefinida sin mayor entrada. El estudio de la termodinámica comienza con un vistazo a uno de sus primeros conceptos: un límite inferior para la temperatura.

El cero absoluto no es lo más frío

que puedes alcanzar. Es lo más frío

***18.2** El cero absoluto*

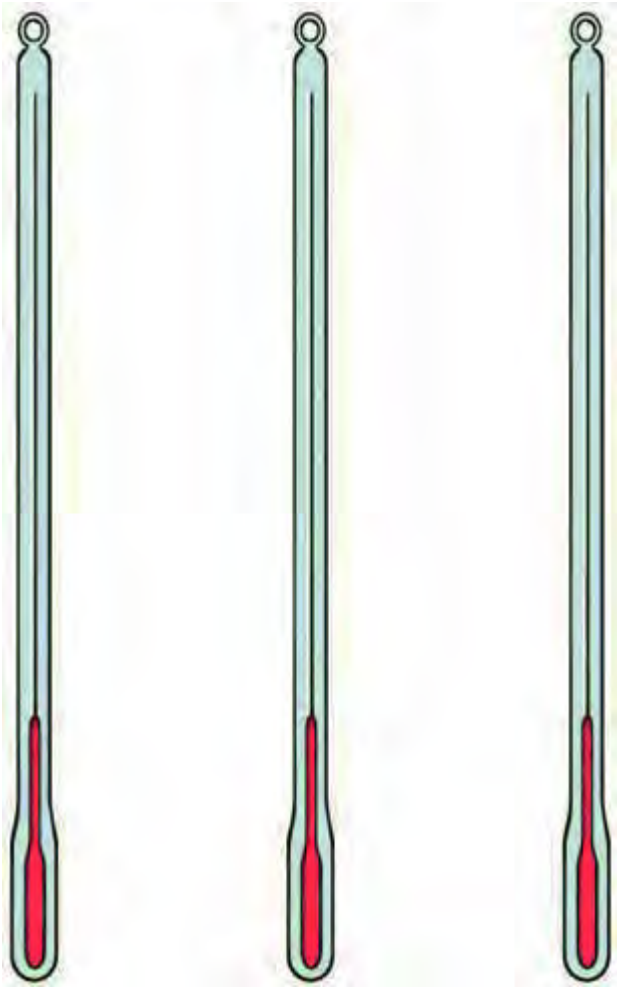
a lo que puedes esperar aproxi-

marte. (Los investigadores han

En principio, no hay un límite superior para la temperatura. A medida que aumenta el estado a una mil millonésima de

movimiento térmico, un objeto sólido primero se funde y luego se evapora; a medida grado de él.)

que la temperatura aumenta aún más, las moléculas se descomponen en átomos y los



338

PA R T E T RES

C A LO R

F I G U R A 1 8 . 1

El pistón gris dentro del vaso baja a

Volumen = 1 + 100

Volumen = 1

273

Volumen = 1 - 100

273 Volumen = 1 - 273

273 = 0

medida que el volumen del gas (azul) se

100°C

encoge. El volumen del gas a 0C cam-

0°C

bia en 1/273 de su volumen con cada

-100°C

cambio de 1

-273°C

C de temperatura cuando

la presión se mantiene constante. (a) A

100C, el volumen es 100/273 mayor de

(a)

(b)

(c)

(d)

lo que es en (b), cuando su temperatura

es 0C. (c) Cuando la temperatura se

reduce a 100C, el volumen se reduce

átomos pierden algunos o todos sus electrones, y por tanto forma una nube de paren 100/273. (d) A 273C, el volumen

tículas con carga eléctrica: un plasma. Esta situación existe en las estrellas, donde la del gas se reduciría en 273/273 y de este

temperatura es de muchos millones de grados Celsius.

modo idealmente sería cero.

Por el contrario, hay un límite determinado en el otro extremo de la escala de temperatura. Los gases se expanden cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían.

Los experimentos del siglo XIX descubrieron que todos los gases, sin importar sus presiones o volúmenes iniciales, cambian en 1/273 de su volumen a 0C por cada grado Celsius de cambio en temperatura, siempre que la presión se mantenga constante.

De modo que, si un gas a 0C se enfriara en 273C, se contraería, de acuerdo con esta regla, en 273/273 de su volumen y se reduciría a volumen cero. Es evidente que no es posible tener una sustancia con volumen cero.

Los científicos también descubrieron que la presión de cualquier gas en cualquier recipiente de volumen fijo cambia en 1/273 de su presión a 0C por cada grado Celsius de cambio de temperatura. De modo que un gas en un recipiente de volumen fijo enfriado a 273C bajo cero no tendría presión en absoluto. En la práctica, todo gas se licua antes de enfriarse tanto. No obstante, estas disminuciones en pequeñas cantidades de 1/273 sugirieron la idea de una temperatura más baja: 273C. De modo que hay límite para la frialdad.

Cuando los átomos y las moléculas pierden toda la energía cinética disponible, llegan al ***cero absoluto*** *de temperatura. A cero absoluto, como se estudió en forma breve en el Capítulo 15, no puede extraerse más energía de una sustancia y ya no es posible una mayor reducción de su temperatura. Esta temperatura límite en realidad es 273.158 bajo cero en la escala Celsius (y 459.78 bajo cero en la escala Fahrenheit).*

La escala de temperatura absoluta se llama escala Kelvin, en honor de lord Kelvin, quien fue el primero en sugerir esta escala de temperatura termodinámica. El cero absoluto es 0 K (abreviatura para "0 kelvin", en lugar de "0 grados kelvin"). En la escala ***F I G U R A 1 8 . 2***

Temperaturas familiares en diferentes

escalas.

212°

100°

373.15 K

98.6°

37°

310.15 K

Temperatura corporal normal

77°

25°

298.15 K

Día caluroso

68°

20°

293.15 K

Temperatura ambiente

32°

0°

273.15 K

Fahrenheit, °F

Celsius, °C

Kelvin, K

Kelvin no hay números negativos. Los grados en la escala Kelvin están calibrados con las divisiones del mismo tamaño que la escala Celsius. Por ende, el punto de fusión del Reactor de fusión

hielo es 273.15 K y el punto de ebullición del agua es 373.15 K.

100,000,000 K

Centro del Sol

20,000,000 K

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Qué es más grande: un grado Celsius o un kelvin?

50,000 K

Superficie de una

2. Un matraz de gas helio tiene una temperatura de 0°C. Si un segundo *estrella caliente*

matraz idéntico, que contiene una masa igual de helio, está el doble de *20,000 K*

caliente (tiene el doble de energía interna), ¿cuál es su temperatura en *Plasma*

kelvin? ¿En grados Celsius?

Superficie del Sol 6,000 K

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

Todas las moléculas

1. *Ninguno. Son iguales.*

se descomponen:

4,300

no hay sólidos ni líquidos

2. *Un recipiente de helio el doble de caliente tiene el doble de temperatura absolu-Lámpara de arco*

4,000 K

ta, o 2 veces 273 K, que es 546 K. Esto es 273C. (Tan sólo resta 273 de la tempera-de carbón

tura Kelvin para convertir a grados Celsius. ¿Puedes ver por qué?)

1,800 K

Fusión del hierro

500 K

+200°C

Fusión del estaño

Energía interna

400 K

Como se estudió brevemente en el Capítulo 15, hay una gran cantidad de energía ence-

+100

rrada en todos los materiales. En este libro, por ejemplo, el papel está compuesto de mo-

˚C

Hierve el agua

léculas que están en constante movimiento. Tienen energía cinética. Debido a las inte-300 K Fusión

0˚C

273 K del hielo

racciones con moléculas vecinas, también tienen energía potencial. Las páginas pueden Hierve el amoniaco

quemarse con facilidad, así que se sabe que almacenan energía química, que en realidad 200 K

–100

es energía potencial eléctrica a nivel molecular. Se sabe que hay grandes cantidades de

˚C

Se evapora el

hielo seco

energía asociadas a los núcleos atómicos. Entonces, hay la "energía del ser", descrita por 100 K

la célebre ecuación E 5 mc 2 (energía masa). La energía a nivel partícula dentro de una

–200˚C

Hierve el oxígeno

Hierve el helio

sustancia se encuentra en estas y otras formas que, cuando se consideran en conjunto,

–273˚C 0 K

se denominan ***energía interna****.1 Si bien la energía interna incluso en la sustancia más* ***FIGURA 18.3***

simple puede ser muy compleja, en el estudio de los cambios de calor y flujo de calor Algunas temperaturas absolutas.

sólo te importarán los cambios en la energía interna de una sustancia. Los cambios de temperatura indican estos cambios en la energía interna.

***18.3** La primera ley de la termodinámica*

Hace unos 200 años se pensaba que el calor era un fluido invisible llamado calórico, que fluye como el agua de los objetos calientes a los objetos fríos. El calórico parecía conservarse; esto es: parecía fluir de un lugar a otro sin crearse ni destruirse. Esta idea fue la precursora de la ley de conservación de la energía. Hacia mediados del siglo XIX, muchos años después de que Rumford demostrara que el calor no era una sustancia en-

¿Buscas un plan de dieta? Consume

cerrada en la materia, se aceptó que el flujo de calor no era más que el flujo de energía menos calorías de las que quemas.

Éste es el único plan de dieta que

en sí. La teoría calórica del calor se fue abandonando poco a poco.2 En la actualidad, se basa firmemente en la primera

el calor se ve como energía que se transfiere de un lugar a otro, por lo general mediante ley de la termodinámica.

colisiones moleculares. El calor es energía en tránsito.

1Si un libro se suspendiera en el borde de una mesa y estuviera listo para caer, poseería energía potencial gravitacional; si se lanzara al aire, poseería energía cinética. Pero éstos no son ejemplos de energía interna, porque involucran más que sólo las partículas de las cuales está compuesto el libro. Incluyen interacciones gravitacionales con la Tierra y movimiento con respecto a la Tierra. Hay una diferencia entre la energía interna de un libro y las formas de energía externa que también pueden actuar sobre el libro.

2Las ideas populares, cuando se demuestra que son equivocadas, rara vez se descartan de inmediato. Las personas tienden a identificarse con las ideas que caracterizan su época; por tanto, con frecuencia son los jóvenes quienes tienen más probabilidad de descubrir y aceptar ideas nuevas e impulsar la aventura humana.

Cuando la ley de conservación de la energía se amplió e incluyó el calor, se le denominó ***primera ley de la termodinámica****. Parte de dicha ley puede enunciarse en la forma siguiente:*

Cuando el calor fluye hacia o desde un sistema, el sistema gana o pierde una cantidad de energía igual a la cantidad de calor

transferido.

Por sistema se entiende un grupo bien definido de átomos, moléculas, partículas u objetos. El sistema puede ser el vapor de una máquina de vapor o puede ser toda la atmósfera de la Tierra. Incluso puede ser el cuerpo de una criatura viva. El punto importante es que debes poder definir qué está contenido dentro del sistema y qué está afuera de él. Si agregas calor al vapor de una máquina de vapor, a la atmósfera de la Tierra o al cuerpo de una criatura viva, agregas energía al sistema. El sistema puede "aprovechar" este calor para aumentar su propia energía interna o realizar trabajo sobre sus alrededores. De modo que agregar calor a un sistema hace una o ambas de dos cosas: (1) aumenta la energía interna del sistema, si permanece en el sistema, o (2) realiza trabajo sobre las cosas externas al sistema, si sale del sistema. De manera más específica, la primera ley afirma:

Calor agregado a un sistema** 5 **aumento de energía interna** 1 **trabajo externo realizado por el sistema.

La primera ley es un principio general que no se ocupa del funcionamiento interno del sistema. Cualesquiera que sean los detalles del comportamiento molecular en el sistema, el calor agregado o aumenta la energía interna de un sistema o permite al sistema ***F I G U R A 1 8 . 4***

realizar trabajo externo (o ambos). La posibilidad de describir y predecir el comporta-Aparato de rueda de paletas utilizado

miento de los sistemas sin la necesidad de analizar complicados procesos atómicos y para comparar el calor con la energía

moleculares es una de las bellezas de la termodinámica. La termodinámica tiende un mecánica. A medida que los pesos caen,

puente entre los mundos microscópico y macroscópico.

ceden energía potencial (mecánica),

Considera una cantidad dada de energía suministrada a una máquina de vapor, ya que se convierte en calor que calienta

el agua. Esta equivalencia de energía

sea en una planta eléctrica o un barco nuclear. La cantidad de energía suministrada se mecánica y térmica la demostró por

hará evidente por la creciente energía interna del vapor y el trabajo

mecánico realizado.

primera vez James Joule, en cuyo honor

La suma del aumento de energía interna y el trabajo realizado igualarán la entrada de la unidad de energía lleva su nombre.

energía. De ninguna manera la energía de salida puede superar la energía de entrada.

La primea ley de la termodinámica es simplemente la versión térmica de la ley de conservación de la energía.

Agregar calor a un sistema de modo que el sistema pueda realizar trabajo mecánico sólo es una aplicación de la primera ley de la termodinámica. Si, en lugar de agregar calor, realizas trabajo mecánico sobre el sistema, la primera ley te dice qué puedes esperar: un aumento de la energía interna. Frota tus palmas de las manos una con otra y se calentarán.

O frota dos varas secas y sin duda se calentarán más. O bombea el mango de una bomba de bicicleta y la bomba se calentará. ¿Por qué? Porque principalmente se realiza trabajo mecánico sobre el sistema y se aumenta su energía interna. Si el proceso ocurre tan rápido que muy poco calor se conduce fuera del sistema, entonces la mayor parte del trabajo de entrada se emplea en aumentar la energía interna, y la temperatura sube.

P U N T O D E C O N T R O L

1. Si 100 J de calor se agregan a un sistema que no realiza trabajo externo,

¿en cuánto aumenta la energía interna de dicho sistema?

2. Si 100 J de calor se agregan a un sistema que realiza 40 J de trabajo externo, ¿en cuánto aumenta la energía interna de dicho sistema?

F I G U R A 1 8 . 5

Cuando realizas trabajo sobre la bomba

al bajar el pistón, comprimes el aire en el

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

interior. ¿Qué ocurre con la temperatura

del aire encerrado? ¿Qué ocurre con

1. *100 J.*

la temperatura del aire si se expande y

2. *60 J. A partir de la primera ley se ve que 100 J 5 60 J 1 40 J.*

empuja el pistón hacia afuera?

18.4 *Procesos adiabáticos*

Comprimir o expandir un gas mientras no entra ni sale calor del sistema se dice que es un ***proceso adiabático*** *(del griego para "intransitable"). Las condiciones adiabáticas pueden lograrse cuando un sistema se aísla térmicamente de sus alrededores (con espuma de estireno, por ejemplo) o cuando se realiza el proceso tan rápido que el calor no tenga tiempo de entrar o salir. Por tanto, en un proceso adiabático, puesto que no entra ni sale calor del sistema, la parte del "calor agregado" de la primera ley de la ter-Conforme se expande un gas, cede*

modinámica debe ser cero. Entonces, bajo condiciones adiabáticas, los cambios en la parte de su energía al realizar

energía interna son iguales al trabajo realizado sobre o por el sistema.

trabajo sobre sus alrededores. Por

tanto, el gas se enfría.

Por ejemplo, si realizas trabajo sobre un sistema al comprimirlo, su energía interna aumenta: se eleva su temperatura. Esto se observa con el

calentamiento de una bomba de bicicleta cuando el aire se comprime. Por el contrario, si el trabajo es realizado por el sistema, su energía interna disminuye: se enfría. Esto se observa en la frialdad de una válvula de neumático si escapa el aire de ella y se expande. El gas que se expande rápidamente se enfría.

Puedes demostrar el enfriamiento del aire mientras se expande si repites el experimento personal de soplar sobre tu mano, estudiado en el Capítulo 16. Sopla aire sobre tu mano, ***VIDEO:***

primero con la boca abierta y luego con los labios juntos de modo que el aire se expanda ***Proceso adiabático***

(Figura 16.5 del Capítulo 16). ¡Tu aliento es mucho más frío cuando el aire se expande!

18.5 *La meteorología y la primera ley*

La termodinámica es útil para los meteorólogos cuando analizan el clima. Los meteorólogos expresan la primera ley de la termodinámica en la siguiente forma: ***La temperatura del aire aumenta a medida que se agrega calor o se aumenta la***

–15°

4 km

presión.

La temperatura del aire puede cambiar si se agrega o sustrae calor, si se cambia la presión del aire (lo que involucra trabajo) o ambos. El calor se agrega mediante radiación

–5°

solar, mediante radiación terrestre de onda larga, mediante condensación de humedad 3 km

o por contacto con el suelo caliente. Esto resulta en un aumento de la temperatura del aire. La atmósfera puede perder calor mediante radiación al espacio, por evaporación de la lluvia que cae a través del aire seco o por contacto con superficies frías. El resul-5°

2 km

tado es un descenso de la temperatura del aire.

Hay algunos procesos atmosféricos en los que la cantidad de calor agregado o sus-traído es muy pequeña, tan pequeña que el proceso es casi adiabático. Entonces se tiene la forma adiabática de la primera ley:

15°

1 km

La temperatura del aire aumenta (o desciende) a medida que la presión aumenta (o disminuye).

Los procesos adiabáticos en la atmósfera son característicos de partes del aire, llamadas Suelo 25°C

parcelas, que tienen dimensiones que van del orden de decenas de metros hasta kilómetros. Dichas parcelas son tan grandes que el aire exterior no se mezcla mucho con ***F I G U R A 1 8 . 6***

el aire de su interior durante los minutos u horas que existen. Se comportan como si La temperatura de una parcela de aire estuvieran encerradas en gigantescas bolsas de tela ligera. A medida que una parcela seco que se expande adiabáticamente fluye hacia arriba por el lado de una montaña, su presión disminuye, lo que permite su disminuye alrededor de 10C por cada expansión y enfriamiento. La presión reducida resulta en una temperatura reducida.3

kilómetro de elevación.

Las mediciones muestran que la temperatura de una parcela de aire seco disminuirá 10C por una reducción de la presión que corresponda a un aumento en altitud de 3Recuerda que, en el Capítulo 16, el enfriamiento del aire en expansión se abordó a nivel microscópico porque se tuvo en cuenta el comportamiento de las moléculas en colisión. En termodinámica, sólo se consideran las mediciones macroscópicas de temperatura y presión para llegar a los mismos resultados. Es bueno analizar las cosas desde más de un punto de vista.

F I G U R A 1 8 . 7

Los chinook, que son vientos cálidos

secos, ocurren cuando aire de gran altitud

Aire húmedo frío

desciende y se calienta adiabáticamente.

Calentamiento

Enfriamiento

Aire

Viento

húmedo

chinook

caliente

1 kilómetro. De modo que el aire seco se enfría 10C por cada kilómetro de ascenso (Figura 18.6). El aire que fluye sobre las montañas altas o se eleva en las tormentas o en los ciclones puede cambiar de elevación por varios kilómetros. En consecuencia, si una parcela de aire seco a nivel del suelo, con una temperatura agradable de 25C, se elevara 6 km, la temperatura sería de unos helados 35C. Por otra parte, si el aire a una temperatura típica de –20C a una altitud de 6 km desciende al suelo, su temperatura sería de unos tremendos 40C. Un ejemplo espectacular de este calentamiento adiabático es el chinook, un viento que sopla desde las montañas Rocosas y atraviesa las grandes planicies estadounidenses. El aire frío que baja de las pendientes de las montañas se comprime en un volumen menor y se calienta mucho (Figura 18.7). El efecto de la expansión o compresión sobre los gases es muy impresionante.4

Una parcela en ascenso se enfría a medida que se expande. Pero el aire circundante también es más frío a mayores elevaciones. La parcela seguirá elevándose en tanto esté más caliente (y, por tanto, menos densa) que el aire circundante. Si se vuelve más fría (más densa) que sus alrededores, se hundirá. Bajo ciertas condiciones, grandes parcelas ***F I G U R A 1 8 . 8***

de aire frío se hunden y permanecen a bajo nivel, con el resultado de que el aire superior La nube de tormenta es resultado del

es más caliente. Cuando las regiones superiores de la atmósfera son más calientes que rápido enfriamiento adiabático de una

las regiones más bajas, se tiene una ***inversión de temperatura*** *(conocido también como masa ascendente de aire húmedo. Ésta*

inversión térmica). Si algo de aire caliente en ascenso es más denso que esta capa superior obtiene energía de la condensación del

de aire caliente, no se elevará más. A menudo esto se vuelve evidente sobre un lago frío vapor de agua.

donde los gases y las partículas visibles, como el humo, se dispersan en una capa plana arriba del lago en lugar de elevarse y disiparse más alto en la atmósfera (Figura 18.9). Las inversiones de temperatura atrapan el esmog y otros contaminantes térmicos. El esmog de Los Ángeles está atrapado por dicha inversión, causada por aire frío de bajo nivel proveniente del océano, sobre el cual hay una capa de aire caliente que se movió sobre las montañas, procedente del más caliente desierto Mojave. Las montañas ayudan a contener el aire atrapado (Figura 18.10). Las montañas en las orillas de Denver tienen la función similar de atrapar el esmog bajo una inversión de temperatura.5

F I G U R A 1 8 . 9

La capa de humo de la fogata sobre el lago indica una inversión de temperatura. El aire arriba del humo es más caliente que el humo; el aire abajo es más frío.

4Es muy interesante que, cuando vuelas a grandes alturas, donde la temperatura del aire exterior por lo general es de 35C, estás muy cómodo en tu cabina caliente, mas no debido a calentadores. El proceso de comprimir aire exterior a la presión de la cabina, que se aproxima a la presión atmosférica a nivel del mar, por lo general calentaría el aire a unos rostizantes 55C (131F). Así que deben usarse acondicionadores de aire para extraer el calor del aire presurizado.

5Estrictamente hablando, los meteorólogos llaman inversión térmica a cualquier perfil de temperatura que obstruya la convección ascendente, incluidos casos en los que las regiones superiores de aire están más frías pero no tan frías como para permitir una convección ascendente continua.

F I G U R A 1 8 . 1 0

Aire caliente

El esmog de Los Ángeles está atrapado

del desierto

por las montañas y una inversión de

temperatura causada por aire caliente

proveniente del desierto Mojave

I n v e r s i ó n d e t e m p e r a t u r a

sobrepuesto al aire frío proveniente del

Océano Pacífico.

Aire frío

Esmog

del océano

Los Ángeles

Océano frío

Las parcelas adiabáticas no están restringidas a la atmósfera y los cambios en ellas no necesariamente ocurren de forma rápida. Algunas corrientes marinas profundas tardan miles de años en circular. Las masas de agua son tan enormes y las conductividades son tan bajas que no se transfieren cantidades apreciables de calor hacia o desde dichas parcelas durante dichos periodos largos. Se calientan o enfrían adiabáticamente mediante cambios en la presión. Los cambios en la convección oceánica adiabática, como lo demuestran sucesos como el recurrente fenómeno El Niño, tienen un gran efecto sobre el clima de la Tierra. La convección oceánica está influida por la temperatura del lecho marino, el cual, a su vez, está influido por las corrientes de convección en el material fundido que yace bajo la corteza de la Tierra (Figura 18.11). Es muy difícil conocer el comportamiento del material fundido en el manto de la Tierra. Una vez que comienza a elevarse una parcela profunda de material líquido caliente dentro del manto, ¿seguirá elevándose hasta la corteza de la Tierra? ¿O su tasa de enfriamiento adiabático la encontrará más fría y más densa que sus alrededores, en cuyo punto se hundirá? ¿La convección se autoperpetúa? En la actualidad, los geofísicos ponderan estas preguntas.

Océano

F I G U R A 1 8 . 1 1

Continente

¿Las corrientes de convección en el manto

Continente

de la Tierra impulsan a los continentes

mientras derivan a través de la superficie

Expansión

del globo? ¿Las parcelas ascendentes de

Compresión

y enfriamiento

material fundido se enfrían más rápido

y calentamiento

o más lento que el material circundante?

¿Las parcelas que se hunden se calientan a

temperaturas por arriba o abajo de las de

Interior caliente

los alrededores? Las respuestas a estas pre-

guntas todavía no se conocen al momento

de escribir esto.

P U N T O D E C O N T R O L

1. Si una parcela de aire seco a 0C en un inicio se expande adiabáticamente mientras fluye hacia arriba a lo largo de una montaña una distancia vertical de 1 km, ¿cuál será su temperatura? ¿Cuál será su temperatura cuando haya subido 5 km?

2. ¿Qué sucede con la temperatura del aire en un valle cuando el

aire frío que sopla por las cimas de las montañas desciende hacia el valle?

A las nubes en las cimas de las

montañas creadas por un enfria-

miento adiabático forzado, en

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

efecto una convección forzada,

1. *A 1 km de elevación, su temperatura será –10C; a 5 km de elevación, –50C.*

los meteorólogos las llaman nubes

2. *El aire se comprime adiabáticamente y la temperatura del valle aumenta. De esta orográficas. Dichas “nubes lenti-forma, los residentes de algunas ciudades del valle de las montañas Rocosas, como culares” a menudo se confunden*

Salida, Colorado, experimentan un clima “bananero” a mediados de invierno.

con OVNI.

18.6 *La segunda ley de la termodinámica*

Supón que colocas un ladrillo caliente junto a un ladrillo frío en una región

térmicamente aislada. Sabes que el ladrillo caliente se enfriará a medida que ceda calor al ladrillo frío, que se calentará. Los dos ladrillos llegarán a una temperatura común: equilibrio térmico. No se perderá energía, de acuerdo con la primera ley de la termodinámica. Pero supón que el ladrillo caliente extrae calor del ladrillo frío y se calienta más. ¿Esto violaría la primera ley de la termodinámica? No, si el ladrillo frío se vuelve correspondientemente más frío, de modo que la energía combinada de ambos ladrillos permanece igual. Si esto ocurriera, no violaría la primera ley de la termodinámica.

Pero violaría la ***segunda ley de la termodinámica****. La segunda ley identifica la dirección de transformación de energía en los procesos naturales. La segunda ley de la termodinámica puede enunciarse en muchas formas, pero, dicho de manera muy simple:* ***El calor por sí mismo nunca fluye de un objeto frío a un objeto caliente.***

En invierno, el calor fluye del interior de una casa caliente al aire frío exterior. En verano, el calor fluye del aire caliente exterior al interior más frío. La dirección del flujo espontáneo de calor es de caliente a frío. El calor puede hacerse fluir en la dirección contraria, del más frío al más caliente, pero sólo si se realiza trabajo sobre el sistema o si se agrega energía desde otra fuente, como sucede con las bombas térmicas y los acondicionadores de aire, los cuales hacen que el calor fluya desde lugares más fríos hacia más calientes.

La enorme cantidad de energía interna del océano no puede usarse para encender una sola bombilla sin esfuerzo externo. La energía por sí misma no fluirá del océano a menor temperatura hacia el filamento de la bombilla a mayor temperatura. Sin esfuerzo externo, la dirección del flujo de calor es de caliente a frío.

P U N T O D E C O N T R O L

¿La energía interna de un enorme iceberg puede explotarse para realizar trabajo?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

De acuerdo con la segunda ley, puede hacer trabajo sobre cosas más frías, pero no sobre cosas más calientes. La energía fluye espontáneamente de caliente a frío, no en la dirección contraria.

Alta

temperatura

Máquinas térmicas

Entrada

Las máquinas fueron el punto focal de la Revolución Industrial durante finales del de calor

siglo XVIII y principios del siglo XIX. Con las esperanzas frustradas por las máquinas Máquina

térmica

de movimiento perpetuo, los científicos e industriales se centraron en la eficiencia de las máquinas reales y los motores que las impulsaban.

Escape

Trabajo realizado

de calor

*Una **máquina térmica** es cualquier dispositivo que utiliza calor como entrada y proporciona trabajo mecánico como salida. La idea básica detrás de una máquina Baja*

temperatura

*térmica (ya sea máquina de vapor, motor de combustión interna o motor jet) es que puede obtenerse trabajo mecánico sólo cuando el calor fluye desde una temperatura **F I G U R A 1 8 . 1 2***

alta hacia una temperatura baja. En toda máquina térmica, sólo parte del calor puede Cuando el calor de una máquina térmi-transformarse en trabajo. Cuando se piensa en máquinas térmicas, se habla de depó-ca fluye del depósito a temperatura alta

sitos. El calor fluye de un depósito de temperatura alta a uno con temperatura baja.

hacia el sumidero a temperatura baja,

Toda máquina térmica (1) gana calor de un depósito de mayor temperatura, lo que parte del calor puede convertirse en tra-aumenta la energía interna de la máquina; (2) convierte parte de esta energía en trabajo bajo. (Si se pone trabajo en una máquina mecánico y (3) expulsa la energía restante como calor hacia algún depósito de menor térmica, el flujo de calor puede ser desde temperatura, por lo general llamado

sumidero (Figura 18.12). En un motor de gasolina, el sumidero a temperatura baja hacia el

depósito a temperatura alta, como en un por ejemplo, (1) los productos de la quema de combustible en la cámara de combustión refrigerador o acondicionador de aire.)

proporcionan el depósito de temperatura alta; (2) los gases calientes realizan trabajo

C A PÍ T U LO 18 T ER M O D I N Á M I C A

345

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

F I G U R A 1 8 . 1 3

Un motor de gasolina de combustión interna a cuatro tiempos. (a) Una mezcla de aire y combustible llena el cilindro a medida que el pistón baja. (b) El pistón se mueve hacia arriba y comprime la mezcla, adiabáticamente, porque no se transfiere mucho calor adentro o afuera. (c) La bujía se enciende e inflama la mezcla, lo que la eleva a una temperatura alta. (d) La expansión adiabática empuja el pistón hacia abajo, el golpe de potencia. (e) Los gases quemados se empujan fuera de la válvula de escape. Entonces se abre la válvula de admisión y el ciclo se repite. Estas etapas pueden ponerse de manera diferente: (a) succión, (b) compresión, (c) explosión, (d) empuje y (e) expulsión.

mecánico sobre el pistón, y (3) el calor se expulsa al ambiente a través del sistema de enfriamiento y del escape (Figura 18.13).

La segunda ley dice que ninguna máquina térmica puede convertir todo el calor suministrado en energía mecánica. Sólo parte del calor puede transformarse en trabajo, Una importante fuente de agua

con el resto expulsado en el proceso. Aplicada a máquinas térmicas, la segunda ley para un camello no es su joroba,

puede enunciarse así:

sino su nariz tan grande, que le

permite extraer agua de su propia

Cuando una máquina térmica que opera entre dos temperaturas, T

y T ,

caliente

fría

respiración exhalada. Sus narinas

realiza trabajo, sólo parte del calor de entrada a T

puede convertirse en

interiores están estructuradas para

caliente

trabajo, y el resto se expulsa a T .

recapturar de manera efectiva la

fría

mayor parte de la humedad conte-

Toda máquina térmica desecha algo de calor, lo cual puede ser deseable o indeseable. El nida en el aire caliente saturado de

aire caliente expulsado por una lavandería o un horno de panadería en un frío día invernal agua que sale de sus pulmones.

puede ser muy deseable, en tanto que el mismo aire caliente en un caluroso día de verano es otra cosa. Cuando el calor expulsado es indeseable se le llama contaminación térmica.

Antes de que los científicos entendieran la segunda ley, muchas personas pensaban que una máquina térmica de muy baja fricción podría convertir casi toda la energía térmica de entrada en trabajo útil. Pero no es así. En 1824, el ingeniero francés Nicolas Léonard Sadi Carnot6 analizó el funcionamiento de una máquina térmica y realizó un descubrimiento

fundamental. Demostró que la mayor fracción de energía de entrada que puede convertirse en trabajo útil, incluso bajo condiciones ideales, depende de la diferencia de temperatu -

ra entre el depósito caliente y el sumidero frío. La ecuación de Carnot es La temperatura corporal de los

camellos puede aumentar varios

T

T

grados arriba de lo normal sin

Eficiencia ideal

caliente

fría

=

−

causar un golpe de calor. Su exceso

ca

T liente

de calor se disipa cuando la tem-

peratura del aire desciende en la

donde T

es la temperatura del depósito caliente y T es la temperatura del sumidero caliente

fría

noche.

frío.7 La eficiencia ideal depende de la diferencia de temperatura entre la admisión y el escape. Siempre que haya razones de temperaturas, debe usarse la escala de temperatura 6Carnot fue hijo de Lazare Nicolas Marguerite Carnot, quien creó los 14 ejércitos después de la revolución,

que defendieron Francia contra toda Europa. Después de su derrota en Waterloo, Napoleón dijo a Lazare: "Mon-sieur Carnot, lo conocí demasiado tarde". Pocos años después de producir su famosa ecuación, Nicolas Léonard Sadi Carnot murió trágicamente a la edad de 36 años, durante una epidemia de cólera que azotó París.

7Eficiencia 5 salida de trabajo/entrada de calor. A partir de la conservación de la energía, entrada de calor 5

salida de trabajo 1 calor que fluye afuera a baja temperatura (véase la Figura 18.12). De modo que: salida de trabajo 5 entrada de calor 2 salida de calor y eficiencia 5 (entrada de calor 2 salida de calor)/(entrada de calor). En el caso ideal, puede demostrarse que la razón (salida de calor)/(entrada de calor) 5 T / T

. Entonces

fría

caliente

puede decirse: eficiencia ideal 5 (T

2 T)/ T

.

caliente

fría

caliente

absoluta, de modo que T

y T se expresan en kelvin. Por ejemplo, cuando el depó-

caliente

fría

sito caliente de una turbina de vapor está a 400 K (127C) y el sumidero está a 300 K

(27C), la eficiencia ideal es:

$$\frac{400 - 300}{400} = \frac{1}{4}$$

400

4

Esto significa que, incluso bajo condiciones ideales, sólo 25% del calor suministrado por el vapor puede convertirse en trabajo, en tanto que el restante 75% se expulsa como desecho.

Es por esto que el vapor se supercalienta a temperaturas altas en las máquinas de vapor y las plantas eléctricas. Mientras mayor sea la temperatura del vapor que impulsa un motor o turbogenerador, mayor es la posible eficiencia de la producción de energía. Por ejemplo, si la temperatura operativa del ejemplo citado fuera 600 K, en lugar de 400 K, la eficiencia sería de (600 2 300)/600 5 ½, que es el doble de la eficiencia a 400 K.

En la Figura 18.14 puedes ver la

importancia de la diferencia de tem-

F I G U R A 1 8 . 1 4

peratura entre el depósito de calor

El ciclo de vapor. La turbina gira porque

Calentador

Vapor a

y el sumidero en el funcionamiento

presión alta

la presión ejercida por el vapor a alta

del motor de la turbina de vapor. El

temperatura sobre el lado frontal de

Vapor

depósito caliente es vapor provenien-

los álabes de la turbina es mayor que el

supercalentado

te del calentador y el sumidero frío

ejercido por el vapor a baja temperatura

Entrada

Turbina

es la región de escape del condensa-

sobre el lado posterior de los álabes. Sin

una diferencia de presión, la turbina

T caliente

dor. El vapor caliente ejerce presión y

no giraría y suministraría energía a una

realiza trabajo sobre los álabes cuan-

Salida

Vapor

carga externa (como a un generador

do empuja sobre sus lados frontales.

a presión

eléctrico). La presencia de presión de

T fría

baja

Esto es bueno. Pero, ¿y si la misma

vapor sobre el lado posterior de los ála-

Condensador

presión de vapor también se ejer-

bes, incluso sin fricción, impide que la

ciera sobre la parte posterior de los

turbina sea una máquina perfectamente

Bomba

álabes? Esto sería contraproducente

eficiente.

¡ESCENIFICACIÓN DE LA TERMODINÁMICA!

Coloca una pequeña cantidad de agua en una lata de Cuando las moléculas de vapor encuentran el agua del plato, ocurre aluminio de gaseosa y caliéntala sobre una estufa hasta

condensación, la que deja una presión muy baja en la lata, gracias a

que emita vapor por la abertura. Cuando esto ocurre,

la cual la presión atmosférica circundante aplasta la lata. Aquí ves, de el aire fue sacado y se sustituyó con vapor. Después, con un par

manera espectacular, cómo la presión se reduce por la condensación.

de pinzas, invierte de manera rápida la lata en un plato con agua.

¿Ahora puedes entender mejor la importancia de la condensación en

¡Crac! ¡La lata se aplasta por la presión atmosférica! ¿Por qué?

la turbina de la Figura 18.14?

y nada agradable. Es vital que se reduzca la presión sobre la parte trasera de los álabes. ¿Cómo se hace? De la misma forma como se reduce la presión interior en la lata de vapor en el proceso descrito en el recuadro "¡Escenificación de la termodinámica!" Si condensas el vapor, la presión sobre las partes posteriores de los álabes se reduce muchísimo. Se sabe que, con vapor confinado, la temperatura y la presión van de la mano: aumenta la temperatura y aumentas la presión; disminuye la temperatura y disminuyes la presión. De modo que la diferencia de presión necesaria para el funcionamiento de una máquina térmica se relaciona directamente con la diferencia de temperatura entre la fuente y el sumidero. Cuanto mayor sea la diferencia de temperatura, mayor será la eficiencia.8

La ecuación de Carnot establece el límite superior de eficiencia para toda máquina térmica, ya sea un automóvil, un barco nuclear o un avión jet. En la práctica, la fricción siempre está presente en todas las máquinas y la eficiencia siempre es menor que la ideal.9 De este modo, mientras que la fricción es la única responsable de las ineficien- ***F I G U R A 18 .15***

cias de muchos dispositivos, el concepto decisivo en el caso de las máquinas térmicas es La Pirámide Transamérica y algunos la segunda ley de la termodinámica: sólo parte del calor de entrada puede convertirse otros edificios se calientan mediante en trabajo, incluso sin fricción.

iluminación eléctrica, que es la razón

por la que las luces están encendidas la

mayor parte del tiempo.

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Cuál sería la eficiencia ideal de una máquina si su depósito caliente y su escape estuvieran a la misma temperatura, por decir, a 400 K?

2. ¿Cuál sería la eficiencia ideal de una máquina que tenga un depósito caliente a 400 K y un depósito frío mantenido de alguna forma en cero absoluto?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Eficiencia cero: (400 2 400)/400 5 0. De modo que no es posible la salida de trabajo en ninguna máquina térmica a menos que exista una diferencia de temperatura entre el depósito y el sumidero.*

2. *Uno: (400 2 0)/400 5 1. Sólo en este caso idealizado es posible una eficiencia ideal de 100%.*

18.7 *La energía tiende a dispersarse*

La primera ley de la termodinámica afirma que la energía no puede crearse ni destruirse. Habla de la cantidad de energía. La segunda ley califica esto al agregar que la forma que toma la energía en las transformaciones se "deteriora" a formas menos útiles. Habla de la calidad de la energía, pues la energía se dispersa y a final de cuentas se degenera en desecho. Otra forma de decir esto es que la energía organizada (energía ***FIGURA 18.16***

de alta calidad, concentrada y, por tanto, útil) se degrada en energía desorganizada Las moléculas de perfume escapan con (energía de baja calidad no utilizable). Por ejemplo, una vez que el agua fluye sobre una facilidad de la botella (un estado más cascada, pierde su potencial para trabajo útil. De igual modo con la gasolina, donde ordenado) al aire (un estado menos orde-la energía organizada se degrada conforme se quema en el motor de un automóvil. nado), no viceversa.

La energía útil se degrada a formas no útiles y es incapaz de realizar el mismo trabajo 8El físico Victor Weisskopf cuenta la historia de un ingeniero que explica el funcionamiento de una máquina de vapor a un campesino. El ingeniero explica con detalle el ciclo de vapor de la máquina, con lo cual el campesino pregunta:

"sí, entiendo todo eso, ¿pero dónde está el caballo?". Es difícil abandonar la forma de mirar el mundo cuando llega un método novedoso que sustituye las formas establecidas.

9La eficiencia ideal del motor de combustión interna de un automóvil es más de 50%, pero, en la práctica, la eficiencia real es de cerca de 25%. Las máquinas con temperaturas operativas más altas (comparadas con las temperaturas del sumidero) serían más eficientes, pero el punto de fusión de los materiales de la máquina limita las temperaturas superiores a las que pueden funcionar. Los motores de los automóviles eléctricos, que están ganando popularidad, sobrepasan por completo las dependencias de temperatura de las máquinas térmicas y son muy eficientes.

de nuevo, como impulsar otro motor de automóvil. El calor, disperso en el ambiente como energía térmica, es el cementerio de la energía útil.

La calidad de la energía se reduce con cada transformación, pues la energía de una forma organizada tiende a degradarse en formas desorganizadas. Con esta perspectiva más amplia, la segunda ley puede enunciarse de otra forma:

En los procesos naturales, la energía de alta calidad tiende a transformarse en F I G U R A 1 8 . 1 7

energía de menor calidad: el orden tiende hacia el desorden.

Si empujas una caja llena con refaccio-

nes de automóvil sobre un piso rugoso,

Piensa en un sistema que consiste en una pila de monedas sobre una mesa, todas todo tu trabajo se va en calentar el piso

con cara arriba. Alguien camina por ahí y de manera accidental choca con la mesa y y la caja. El trabajo contra la fricción

las monedas caen al suelo, seguramente no todas cara arriba. El orden se convierte en produce calor, que no puede realizar

desorden. Las moléculas de gas que se mueven todas en armonía constituyen un estado trabajo alguno sobre la caja. La energía

ordenada se transforma en energía

ordenado, y también un estado improbable. Por otra parte, las moléculas de gas que se desordenada.

mueven en direcciones azarosas con un amplio rango de rapideces constituyen un estado caótico desordenado (y más probable). Si retiras la tapa de una botella de perfume o abres la puerta del horno donde hay una charola con galletas de chocolate horneadas, las moléculas escapan a la habitación y constituyen un estado más desordenado. El orden relativo se convierte en desorden. No esperarías que lo contrario sucediera por sí solo; esto es: no esperarías que las moléculas del perfume o las galletas se ordenaran solas de manera espontánea de vuelta en la botella o la charola y, por tanto, regresaran al estado más ordenado.

Los procesos en los que el desorden regresa al orden sin ninguna ayuda externa no ocurren en la naturaleza. Es interesante que al tiempo se le asigne una dirección con esta regla termodinámica. La flecha del tiempo siempre apunta del orden al desorden.10

La energía desordenada puede cambiarse a energía ordenada sólo con esfuerzo de organización o entrada de trabajo. Por ejemplo, el agua en un refrigerador se congela y Los sistemas biológicos son enor-se vuelve más ordenada porque se pone trabajo en el ciclo de refrigeración; el gas pue-memente complejos y, mientras

de ordenarse en una pequeña región si un compresor alimentado con energía externa viven, nunca alcanzan el equilibrio

realiza trabajo. Los procesos en los que el efecto neto es un aumento de orden siempre térmico.

necesitan una entrada externa de energía. Pero, para tales procesos, siempre hay un aumento de desorden en alguna otra parte que compensa de sobra el aumento del orden.

P U N T O D E C O N T R O L

En tu habitación probablemente hay unas 1027 moléculas de aire. Si todas ellas se congregaran en el lado opuesto de la habitación, podrías asfixiar-te. Pero esto es improbable. ¿Tal congregación espontánea de moléculas es menos probable, más probable o de la misma probabilidad si hubiera menos moléculas en la habitación?

Los tiburones dependen de un gel

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

bajo su piel que detecta cambios

Menos moléculas significan mayor probabilidad de su congregación espontánea en extremadamente pequeños en la

el lado opuesto de tu habitación. La exageración hace esto creíble: si sólo hay una temperatura del océano: menos de

molécula en la habitación, hay un 50% de posibilidad de que esté en la otra mitad una milésima de grado Celsius. Es

de la habitación. Si tienes dos moléculas, las posibilidades de que ambas estén en un muy probable que esta habili-lado al mismo tiempo es 25%. Si hay tres moléculas, la posibilidad de que te quedes dad les ayude a detectar sutiles

sin respiración es de un octavo (12.5%). Cuanto mayor sea el número de moléculas, fronteras de temperatura donde se

mayores son las posibilidades de que haya casi igual número de moléculas en ambos encuentran sus presas.

lados de la habitación.

10Los sistemas reversibles parecen razonables cuando ves una película que se corre hacia atrás. ¿Recuerdas aquellas películas antiguas donde un tren se detiene a pulgadas de la heroína amarrada a las vías? ¿Cómo se hizo esto sin accidentes? Sencillo. El tren comenzó en el reposo, a pulgadas de la heroína, y corrió hacia atrás, adquiriendo rapidez. Cuando la película se invierte, se ve que el tren se mueve hacia la heroína. ¡Observa con

detenimiento el humo delator que entra en la chimenea!

C A PÍ T U LO 18 T ER M O D I N Á M I C A

349

***18.8** Entropía*

La energía tiende a dispersarse: el aire caliente de un horno caliente se dispersa cuando se abre la puerta del horno. La energía tiende a degradarse: la energía encerrada en los enlaces químicos de la madera se degrada cuando la madera se quema. ***Entropía*** *es el término que se usa para describir la dispersión o degradación natural de la energía.*

La entropía puede medirse por la cantidad de desorden de un sistema.11 Más entropía significa más dispersión o más degradación de energía. Dado que la energía tiende a dispersarse y degradarse con el tiempo, la cantidad total de entropía en cualquier sistema tiende a aumentar con el tiempo. Siempre que a un sistema físico se le permita ***F I G U R A 1 8 . 1 8***

distribuir su energía en forma libre, siempre lo hará en una forma tal que la entropía Entropía.

aumente mientras disminuya la energía restante del sistema disponible para realizar trabajo.

F I G U R A 1 8 . 1 9

¿Por qué el lema de este contratista

(“aumentar la entropía es nuestro nego-

cio”) es tan apropiado?

“AUMENTAR LA ENTROPÍA

ES NUESTRO NEGOCIO”

La entropía neta del Universo aumenta de manera continua (continuamente corre

“colina abajo”). Se dice neta porque hay algunas regiones en las que la energía en realidad se organiza y concentra. Esto ocurre en los organismos vivos, que sobreviven al concentrar y organizar la energía de las fuentes de alimentos. Todos los organismos vivos, desde bacterias hasta árboles y seres humanos, extraen energía de sus alrededores y la utilizan para aumentar su propia organización (crecimiento y reparación). En los organismos vivos, la entropía disminuye. Pero el orden en las formas de vida se mantiene al aumentar la entropía en alguna otra parte, lo que resulta en un aumento neto de la entropía.

La energía debe transformarse en los sistemas vivos para sostener la vida. Cuando no lo hace, el organismo muere pronto y tiende hacia el desorden.12

Viejo acertijo: “¿Cómo regresa-

La primera ley de la termodinámica es una ley universal de la naturaleza a la que rías a su forma original un huevo

revuelto?” Respuesta: “Dáselo de

no se han observado excepciones. Sin embargo, la segunda ley es un enunciado proba-comer a un pollo”. Pero incluso

bilístico. Con suficiente tiempo, incluso los estados más improbables pueden ocurrir; entonces no obtendrías de vuelta

en ocasiones puede disminuir la entropía. Por ejemplo, los movimientos azarosos de el huevo original. La elaboración

las moléculas del aire podrían volverse, por un momento, armoniosos en una esquina de huevos requiere energía y

de la habitación, tal como una pila alta de monedas derramadas sobre el suelo podrían aumenta la entropía.

todas caer en cara. Estas situaciones son posibles, pero no son probables. La segunda ley manifiesta el curso más probable de los eventos, no el único posible.

11La entropía puede expresarse matemáticamente. El aumento de entropía D S de un sistema termodinámico es igual a la cantidad de calor agregado al sistema D Q dividido entre la temperatura T a la que se agrega calor: D S 5 D Q/ T.

12Es muy interesante que el escritor estadounidense Ralph Waldo Emerson, quien vivió durante la época en la cual la segunda ley de la termodinámica era el nuevo tema científico del día, especulara filosóficamente que no todo se vuelve más desordenado con el tiempo y citó el ejemplo del pensamiento humano. Las ideas sobre la naturaleza de las cosas se perfeccionan cada vez más y se organizan mejor a medida que pasan por las mentes de las generaciones siguientes. El pensamiento humano evoluciona hacia más orden.

350

PA

PA R T E

E T RE

RES

C A LO

LO R

Con frecuencia, las leyes de la termodinámica se enuncian de esta forma: no puedes ganar (porque no puedes obtener más energía de un sistema de la que pones en él), no puedes empatar (porque no puedes obtener tanta energía útil como la que pones) y no puedes salir del juego (la entropía en el universo siempre aumenta).

Una tercera ley de la termodinámica afirma que ningún sistema puede reducir su temperatura absoluta a cero. Una y otra vez los investigadores han intentado alcanzar esta temperatura huidiza, acercándose mucho, pero sólo acercándose. También existe una ley cero de la termodinámica, que afirma que dos sistemas, cada uno en equilibrio térmico con un tercer sistema, están en equilibrio uno con otro. La importancia de esta ley se reconoció sólo después de nombrar la primera, segunda y tercera leyes, de ahí que pareció adecuado el encantador nombre de "cero".

RESUMEN DE TÉRMINOS *(CONOCIMIENTO)*

Termodinámica. *El estudio del calor y su transformación en diferentes formas de energía.*

Inversión de temperatura. *Condición en la que cesa la convección ascendente del aire, con frecuencia debido a que una región superior de la atmósfera está más caliente que la región bajo el a.*

Cero absoluto. *La temperatura más baja posible que puede tener una sustancia; temperatura a cual las partículas de una sustancia tienen su mínima energía cinética.*

Segunda ley de la termodinámica. *La energía térmica nunca fluye de forma espontánea de un objeto frío a un objeto caliente. Además, ninguna máquina puede ser completamente eficiente al convertir calor a trabajo; parte del calor suministrado a la máquina con temperatura alta se disipa como calor de desecho a una temperatura más baja. Y, al final, todos los sistemas tienden a volverse cada vez más desordenados con el tiempo.*

Energía interna. *La energía total (cinética más potencial) de las partículas submicroscópicas que constituyen una sustancia. Los cambios de energía interna son de principal preocupación en termodinámica.*

Primera ley de la termodinámica. *Un replanteamiento de la ley de conservación de la energía, aplicada a sistemas en*

los que la energía se transfiere por calor y/o trabajo. El calor

Máquina térmica. *Dispositivo que utiliza calor como entrada y agregado a un sistema es igual a su aumento de energía*

suministra trabajo como salida.

interna más el trabajo externo que realiza sobre su ambiente.

Entropía. *Medida del desorden de un sistema. Siempre que la*

Proceso adiabático. *Proceso, con frecuencia expansión o*

energía se transforma de manera libre de una forma a otra,

compresión rápidas, en el que no entra o sale calor de un

la dirección de transformación es hacia un estado de mayor

sistema.

desorden y, por tanto, hacia uno de mayor entropía.

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S *(C O M P R E N S I Ó N)*

18.1 Termodinámica

6. ¿Cuál es la menor temperatura posible en la escala Celsius?

1. ¿Cuál es el origen y significado de la palabra termodinámica?

¿En la escala Kelvin?

2. ¿El estudio de la termodinámica se ocupa principalmente

7. ¿La principal preocupación en el estudio de la termodiná-

de los procesos microscópicos o de los macroscópicos?

mica es la cantidad de energía interna de un sistema o los

cambios de energía interna en una sustancia?

18.2 El cero absoluto

3. ¿En cuánto se contrae el volumen de un gas a 0C por

18.3 La primera ley de la termodinámica

cada disminución en temperatura de 1 grado Celsius cuan-

8. ¿Cuál es la relación entre la ley de conservación de la

do la presión se mantiene constante?

energía y la primera ley de la termodinámica?

4. ¿En cuánto disminuye la presión de gas a 0C por cada

9. ¿Qué se entiende por sistema?

disminución en temperatura de 1 grado Celsius cuando el

10. ¿Cuál es la relación entre el calor agregado a un sistema,

volumen se mantiene constante?

el cambio en la energía interna de un sistema y el trabajo

5. Si supones que el gas no se condensa a líquido, ¿a qué

externo realizado por el sistema?

volumen se aproxima un gas a 0C enfriado en 273 gra-

11. ¿Qué ocurre con la energía interna de un sistema cuando

dos Celsius?

sobre él se realiza trabajo mecánico? ¿Qué ocurre con su

temperatura?

18.4 Procesos adiabáticos

22. ¿Cómo se relaciona la segunda ley con las máquinas

12. ¿Qué condición es necesaria para que un proceso sea

térmicas?

adiabático?

23. ¿Por qué es tan esencial la parte de condensación del ciclo

13. Si se realiza trabajo sobre un sistema, ¿la energía inter-en una turbina de vapor?

na del sistema aumenta o disminuye? Si el trabajo es

18.7 La energía tiende a dispersarse

reali zado por un sistema, ¿la energía interna del sistema

aumenta o disminuye?

24. Distingue entre energía de alta calidad y energía de baja

calidad en términos de energía organizada y desorganiza-

18.5 La meteorología y la primera ley

da. Ofrece un ejemplo de cada una.

14. ¿Cómo expresan los meteorólogos la primera ley de la

25. ¿Cómo puede enunciarse la segunda ley con respecto a las

termodinámica?

energías de alta calidad y de baja calidad?

15. ¿Cuál es la forma adiabática de la primera ley?

26. Con respecto a los estados ordenados y desordenados,

16. ¿Qué ocurre generalmente con la temperatura del aire

¿qué tienden a hacer los sistemas naturales? ¿Un estado

que asciende? ¿Del aire que baja?

desordenado alguna vez puede transformarse en un

17. ¿Qué es la inversión de temperatura?

estado ordenado? Explica.

18. ¿Los procesos adiabáticos se aplican sólo a los gases?

18.8 Entropía

Defiende tu respuesta.

27. ¿Cuál es el término de un físico para medida de cantidad

18.6 La segunda ley de la termodinámica

de desorden?

19. ¿Cómo se relaciona la segunda ley de la termodinámica

28. Distingue entre la primera y la segunda leyes de la termo-

con la dirección del flujo de calor?

dinámica en términos de si ocurren o no excepciones.

20. ¿Cuáles tres procesos ocurren en toda máquina térmica?

29. ¿Cuál es la tercera ley de la termodinámica?

P I E N S A Y R E A L I Z A *(A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 31. Realiza la actividad del recuadro "¡Escenificación de la*

32. Con un martillo, clava un clavo en un trozo de madera.

termodinámica!" Demuestra que el agua del plato no

¡Saca el clavo rápidamente y siente su calor! ¡El Piensa y

debe estar fría para que la lata colapse. Prueba con agua

resuelve número 41 lleva esto un paso adelante!

caliente (pero no hirviendo) y verás colapso. ¡Impresiona

a tus amigos con esto!

S U S T I T U Y E Y L I S T O *(F A M I L I A R I Z A C I Ó N C O N E C U A C I O N E S) 34. Calcula la eficiencia ideal de una máquina en la que el*

combustible se calienta a 2,700 K y el aire circundante

está a 200 K.

33. Demuestra que la eficiencia ideal es 90% para una

máquina en la que el combustible se calienta a 3,000 K y

el aire circundante está a 300 K.

P I E N S A Y R E S U E L V E *(A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 35. ¿Cuál es la eficiencia ideal de un motor de automóvil que*

cuál sería su temperatura si pudieras jalarla súbitamente de

funciona entre las temperaturas 600 y 320C? (¿Por

vuelta a la superficie de la Tierra.

qué tu respuesta no es 47%?)

39. Wally Majareta afirma haber inventado una máquina

36. Considera una planta eléctrica de conversión de energía

térmica que revolucionará la industria. Funciona entre

térmica oceánica (OTEC, por sus siglas en inglés) que

una fuente caliente a 300C y un sumidero frío a 25C.

funciona sobre una diferencia de temperatura entre agua

Afirma que su máquina es 92% eficiente.

profunda a 4C y agua superficial a 25C. Demuestra que

a. ¿Qué error cometió en su elección de escalas de

la eficiencia de Carnot de esta planta es 7%.

temperatura?

37. En un frío día a 10C, tu amiga, quien adora el clima

b. ¿Cuál es la eficiencia máxima real de su máquina?

frío, dice que le gustaría que hiciera el doble de frío. Si

40. Una estación eléctrica, con una eficiencia de 0.4, genera

tomas esto literalmente, demuestra que la temperatura

108 W de energía eléctrica y disipa 1.5 3 108 J de energía

que desea sería 131.5C.

térmica cada segundo hacia el agua de enfriamiento que

38. Imagina una gigantesca bolsa de tintorería llena de aire

fluye por ella, lo que aumenta su temperatura en 3 grados

a una temperatura de 35C flotando como un globo con

Celsius. Al saber que el calor específico del agua en

una cuerda que cuelga de el a 10 km sobre el suelo. Estima

unidades SI es 4,184 J/kg?8C, demuestra que 12,000 kg

de agua calentada fluyen por la planta cada segundo.

41. Considera un clavo de acero de 6.0 g y 8.0 cm de largo,

42. Construye una tabla de todas las posibles combinaciones

y un martillo que ejerce una fuerza promedio de 600 N

de números que puedan salir cuando lanzas dos dados. Tu

sobre el clavo cuando lo clava en un trozo de madera.

amigo dice: “sí, sé que 7 es el número total más probable

El clavo se calienta más. Demuestra que el aumento de

cuando lanzas dos dados. ¿Pero por qué 7?” Con base en tu

temperatura del clavo es 17.8C. (Supón que la capacidad

tabla, responde a tu amigo y explícale que, en termodinámi-

calorífica específica del acero es 450 J/kg?8C.)

ca, las situaciones que son probables de observar son aque-

l as que pueden formarse en el mayor número de modos.

P I E N S A Y E X P L I C A *(S Í N T E S I S)*

43. Un amigo dice que la temperatura dentro de un horno

59. ¿Bajo qué condiciones una máquina térmica sería 100%

particular es 500 y la temperatura dentro de una estre -

eficiente?

lla particular es 50,000. Tú no estás seguro de si tu

60. Para aumentar la eficiencia de una máquina térmica,

amigo se refiere a grados Celsius o kelvins. ¿Cuánta dife-

¿sería preferible producir el mismo incremento de tempe-

rencia hace esto en cada caso?

ratura al aumentar la temperatura del depósito mientras

44. La temperatura del interior del Sol es de unos 107 grados.

se mantiene constante la temperatura del sumidero, o dis-

¿Importa si esto es grados Celsius o kelvins? Explica.

minuir la temperatura del sumidero mientras se mantiene

45. Cuando el calor fluye desde un objeto caliente en con-

constante la temperatura del depósito? Explica.

tacto con un objeto frío, ¿ambos objetos experimentan la

61. ¿Podrías enfriar una cocina si dejas abierta la puerta del

misma cantidad de cambio de temperatura?

refrigerador y cierras la puerta y las ventanas de la cocina?

46. Piensa en un frasco de helio con una temperatura de

Explica.

0C. ¿Cuál será su temperatura si está el doble de caliente

62. ¿Podrías calentar una cocina si dejas abierta la puerta de

(tiene el doble de energía interna)?

un horno caliente? Explica.

47. Si agitas vigorosamente una lata de caldo de pollo durante

63. Un ventilador eléctrico no sólo no reduce la temperatura

más de un minuto, ¿la temperatura del caldo aumentará?

del aire, sino que en realidad aumenta la temperatura del

(Inténtalo y observa.)

aire. ¿Cómo, entonces, te enfrías con un ventilador en un

48. Cuando el aire se comprime con rapidez, ¿por qué aumen-

día caluroso?

ta su temperatura?

64. Estrictamente hablando, ¿por qué un refrigerador que con-

49. Supón que realizas 100 J de trabajo al comprimir un gas.

tiene una cantidad fija de alimentos consumirá más energía

Si en el proceso escapan 80 J de calor, ¿cuál es el cambio

en una habitación caliente que en una habitación fría?

en la energía interna del gas?

65. Un refrigerador mueve calor de frío a caliente. ¿Por qué

50. ¿Por qué el fondo de una bomba de neumáticos se sien-

esto no viola la segunda ley de la termodinámica?

te caliente cuando bombeas aire en el neumático, pero

66. ¿Qué ocurre con la densidad de una cantidad de gas

cuando se libera aire, la válvula se siente fría?

cuando su temperatura disminuye y su presión se mantie-

51. Cuando inflas un globo, ¿calientas un poco el globo? Cuan-

ne constante?

do dejas salir aire de él, ¿cómo, si acaso, cambia la tempera-

67. Si oprimes un globo lleno de aire y no escapa calor, ¿qué

tura del aire en expansión?

ocurre con la energía interna del gas en el globo?

52. ¿Qué ocurre con la presión del gas en el interior de una lata

68. En los edificios que se calientan eléctricamente, ¿es un

de galón sellada cuando se calienta? ¿Cuando se enfría?

completo despilfarro encender todas las luces? ¿Es un

¿Por qué?

desperdicio encender todas las luces si el edificio se enfría

53. ¿Por qué el aire frío de montaña se calienta cuando des-

con acondicionadores de aire?

ciende hacia un valle?

69. ¿Por qué el pájaro bebedor de la Figura 17.4 del Capí -

54. ¿Cuál es la fuente final de la energía en el carbón, el petró-

tulo 17 puede considerarse una máquina térmica?

leo y la madera? ¿Por qué a la energía de la madera se le

70. Las moléculas en la cámara de combustión del motor de

llama renovable pero a la energía del carbón y el petróleo,

un cohete están en un alto estado de movimiento aleato-

no renovable?

rio. Cuando las moléculas se expulsan por la tobera en un

55. ¿Cuál es la fuente final de la energía en una planta

estado más ordenado, ¿su temperatura será mayor, menor

hidroeléctrica?

o la misma que su temperatura inicial en la cámara antes

56. ¿Por qué es conveniente usar vapor tan caliente como sea

de ser expulsadas?

posible en una turbina impulsada por vapor?

71. ¿La energía total del Universo se vuelve más indisponible

57. ¿Cómo se relaciona la eficiencia ideal de un automó-

con el tiempo? Explica.

vil con la temperatura del motor y la temperatura del

72. De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica,

ambiente en el que funciona? Sé específico.

¿el Universo se mueve hacia un estado más ordenado o

58. ¿Qué ocurre con la eficiencia de una máquina térmica

hacia un estado más desordenado?

cuando baja la temperatura del depósito hacia el cual se

73. ¿Las parcelas adiabáticas ocurren en la atmósfera, en el

transfiere energía térmica?

océano o en ambos?

C C

A H

PÍ A

T P

U T

L E

O R 1

18 8

R R

E E

V V

I SI E W

Ó N

353

74. El océano posee enormes cantidades de moléculas, todas

77. El agua que pones en el compartimiento del congelador

con energía cinética. ¿Esta energía puede extraerse y

de tu refrigerador pasa a un estado de menos desorden

aprovecharse como fuente de electricidad? Defiende tu

molecular cuando se congela. ¿Ésta es una excepción al

respuesta.

principio de entropía? Explica.

75. ¿Por qué se dice que una sustancia en una fase líquida

78. Conforme un pollo se desarrolla a partir de un huevo,

está más desordenada que la misma sustancia en una fase

se vuelve más ordenado con el tiempo. ¿Esto viola el

sólida?

principio de entropía? Explica.

76. El agua se evapora de una solución salina y deja detrás

79. La Oficina de Patentes y Marcas de Estados Unidos

cristales de sal que tienen un mayor grado de orden mo -

rechaza las afirmaciones de máquinas de movimiento

lecular que las moléculas con movimiento más aleatorio

perpetuo (en las cuales la energía de salida es tan

en el agua salada. ¿Se viola el principio de entropía? ¿Por

grande o mayor que la energía de entrada) sin siquiera

qué sí o por qué no?

investigarlas. ¿Por qué hace esto?

P I E N S A Y D I S C U T E *(E V A L U A C I Ó N)*

80. Discute si es posible convertir totalmente una cantidad

la taza de té en el lago y que el té absorbe 10 calorías del

dada de energía mecánica en energía térmica. ¿Es posible

agua y se calienta más, en tanto que el agua que cede

convertir en su totalidad una cantidad dada de energía

10 calorías se enfría más. ¿Esta transferencia de energía

térmica en energía mecánica? Cita ejemplos que ilustren

violaría la primera ley de la termodinámica? ¿La segunda

tus respuestas.

ley de la termodinámica? Discute tus respuestas.

81. El calor siempre fluye de manera espontánea de un objeto

87. ¿Por qué la contaminación térmica es un término relativo?

con una temperatura más alta hacia un objeto con una

88. El recuadro "¡Escenificación de la termodinámica!"

temperatura más baja. ¿Esto es lo mismo que decir que

muestra cómo se aplasta una lata llena de vapor invertida

el calor siempre fluye de un objeto con mayor energía

sobre un plato con agua. ¿El agua necesita estar fría?

interna hacia uno con menor energía interna? Discute por

¿Ocurriría aplastamiento si el agua estuviera caliente mas

qué sí o por qué no.

no en ebullición? ¿La lata se aplastaría en agua hirviendo?

82. Todos saben que el aire caliente sube. Así que puede

Discute esto, ¡y luego inténtalo y observa!

parecer que la temperatura del aire debería ser mayor en

89. Defiende la afirmación de que 100% de la energía eléctri-

las cimas de las montañas que colina abajo. Discute por

ca que se usa para iluminar una lámpara se convierte en

qué lo opuesto es lo más frecuente.

energía térmica. ¿Se violan la primera y segunda leyes de

83. Sobre la superficie de tu piel flota una capa de aire de

la termodinámica?

unos 3 milímetros de grosor que actúa como cobija

90. Discute este enunciado: la segunda ley de la termodinámi-

térmica. En un día caluroso, ¿qué efecto tiene una brisa

ca es una de las leyes más fundamentales de la naturaleza,

sobre tu piel desnuda? ¿Qué efecto tiene en un día frío?

aunque no sea una ley exacta en absoluto. ¿Por qué no?

84. Tu corazón es una bomba que suministra sangre a todas

91. Por lo general se supone que las máquinas de movimiento

las partes de tu cuerpo, incluido tu cerebro. El movi-

perpetuo son imposibles de construir. ¿Es incongruente

miento de las partículas en el cerebro, como en cualquier

decir que las moléculas están en movimiento perpetuo?

dispositivo, genera calor. ¿Qué sugiere esto acerca de las

92. Un compañero de clase dice que todo este asunto del

temperaturas de la sangre que entra a tu cerebro y la san-

movimiento perpetuo es una patraña; que átomos, plane-

gre que sale de tu cerebro (y por qué esto puede afectar la

tas, estrellas y todo está en movimiento perpetuo. ¿Qué

concentración)?

distinción falta aquí?

85. La temperatura en Boston era de 408F cuando era de

93. (a) Si pasas 10 minutos agitando en forma repetida y

808F en San Petersburgo, FL. ¿Cuál es tu respuesta a

lanzando un par de monedas, ¿esperarías ver dos caras

un amigo quien sugiere que en San Petersburgo hacía el

salir al menos una vez? (b) Si pasas una hora agitando un

doble de calor ese día?

puñado de 10 monedas y lanzándolas al suelo, ¿esperarías

86. Las energías cinéticas moleculares combinadas de las

ver a las 10 salir con cara al menos una vez? (c) Si agitas

moléculas en un lago frío son mayores que las energías

una caja con 10,000 monedas y las lanzas repetidamente

cinéticas moleculares combinadas de las moléculas en

al suelo todo el día, ¿esperarías ver a las 10,000 aparecer

una taza de té caliente. Supón que sumerges parcialmente

con cara al menos una vez? Discute.

P A R T E T R E S *Examen de práctica de opción múltiple*

Elige la MEJOR respuesta a cada una de las siguientes:

17. La ley de enfriamiento de Newton se aplica a objetos que

(a) se enfrían.

(c) Ambos.

1. Por lo general, la temperatura es proporcional a la

de

(b) se calientan.

(d) Ninguno.

una sustancia.

18. Comparada con la radiación proveniente del Sol, la radiación

(a) energía térmica

terrestre tiene una más baja

(b) energía cinética de vibración

(a) longitud de onda.

(c) Ambos.

(c) energía cinética traslacional promedio

(b) frecuencia.

(d) Ninguno.

(d) energía cinética rotacional

19. Cuando moléculas con movimiento relativamente lento se con-

2. El calor es simplemente otra palabra para

densan del aire, la temperatura del aire restante tiende a

(a) temperatura.

(a) permanecer invariable. (c) aumentar.

(b) energía interna.

(b) disminuir.

(d) dispersarse de manera uniforme.

(c) energía interna que fluye de caliente a frío.

20. Pon una cacerola con agua sobre tu mesa. Un proceso que ocurre

(d) energía radiante.

entonces es

3. ¿Cuál de estas temperaturas es probable cuando un recipiente

(a) evaporación.

(c) Ambos.

con agua a 20C se mezcla con agua a 28C?

(b) condensación.

(d) Ninguno.

(a) 19C.

(c) 30C.

21. El proceso de hervir el agua tiende a

(b) 22C.

(d) Mayor que 30C.

(a) calentar el agua.

(c) Ambos.

4. La cantidad de calor transferido a un sistema puede medirse en

(b) enfriar el agua.

(d) Ninguno.

(a) calorías.

(c) Cualquiera de ellos.

22. Ebullición y congelación ocurren cuando el agua se sujeta a

(b) joules.

(d) Ninguno de ellos.

(a) temperaturas reducidas.

5. La arena caliente se enfría más rápido en la noche que la vegeta-

(b) presión atmosférica reducida.

ción. Comparada con la vegetación, la capacidad calorífica espe-

(c) temperaturas aumentadas.

cífica de la arena es

(d) presión atmosférica aumentada.

(a) menor.

(c) aproximadamente la misma.

23. El rehielo ocurre debido a

del agua.

(b) mayor.

(d) No se puede decir.

(a) el alto calor específico

6. Cuando la temperatura de una tira de hierro aumenta, la longi-

(b) los cristales de hielo de estructura abierta

tud de la tira

(c) la alta tasa de expansión

(a) también aumenta.

(d) la leve tendencia a congelarse cuando la temperatura se reduce

(b) en realidad disminuye.

24. Cuando el agua cambia a vapor, la energía se

(c) puede aumentar y puede disminuir.

(a) absorbe por el agua.

(d) disminuye en ancho a medida que se alarga.

(b) libera por el agua.

7. El cieno microscópico en el agua tiende a hacer al agua

(c) conserva a medida que ocurre el cambio de fase.

(a) más densa.

(c) más resbalosa.

(d) cambia a una forma diferente.

(b) menos densa.

(d) más caliente.

25. La temperatura más baja posible es el cero absoluto a

8. La principal fuente de energía interna de la Tierra es

(a) 0 kelvin.

(c) Ambos son lo mismo.

(a) la fricción de las mareas. (c) la radiactividad.

(b) −273C.

(d) Ninguno de ellos.

(b) la presión gravitacional. (d) el calor geotérmico.

26. Cuando respiras sobre tu mano, la temperatura del aire exhalado

9. La superficie del planeta Tierra pierde energía hacia el espacio

que llega a tu mano

exterior debido principalmente a

(a) aumenta.

(c) permanece invariable.

(a) conducción.

(c) radiación.

(b) disminuye.

(d) depende de cómo soples.

(b) convección.

(d) radiactividad.

27. La segunda ley de la termodinámica dice que el calor no fluye de

10. Los gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamien-

(a) caliente a frío jamás.

to global son

(b) frío a caliente jamás.

(a) vapor de agua.

(c) Ambos.

(c) caliente a frío sin energía externa.

(b) dióxido de carbono.

(d) Ninguno.

(d) frío a caliente sin energía externa.

11. En una mezcla de gases hidrógeno, oxígeno y nitrógeno a una tem-

28. Las máquinas térmicas, como un motor jet, son más eficientes

peratura dada, las moléculas más rápidas en promedio son las de

cuando funcionan a

(a) hidrógeno.

(c) nitrógeno.

(a) temperaturas altas.

(c) temperaturas bajas.

(b) oxígeno.

(d) Todas tienen la misma rapidez promedio.

(b) temperaturas constantes. (d) una tasa constante.

12. La conducción térmica involucra principalmente

29. La dirección de los procesos naturales es de estados de

(a) electrones.

(c) neutrones.

(a) mayor orden a menor orden.

(b) protones.

(d) iones.

(b) menor orden a mayor orden.

13. La convección térmica involucra principalmente

(c) desorganización a organización.

(a) energía radiante. (c) aislantes.

(d) desorden a equilibrio.

(b) fluidos.

(d) Todo esto.

30. A medida que aumenta la entropía de un sistema, la energía en el

14. El calor viaja del Sol a la Tierra por el proceso de

sistema

(a) conducción. (c) radiación.

(a) se vuelve más ordenada.

(b) convección.

(d) Todo esto, aunque la radiación es mayor.

(b) se vuelve menos ordenada.

15. Una fuente a temperatura alta radia relativamente

(c) alcanza el equilibrio.

(a) longitudes de onda corta. (c) frecuencias bajas de radiación.

(d) se mueve hacia la destrucción.

(b) longitudes de onda larga. (d) Ninguna de éstas.

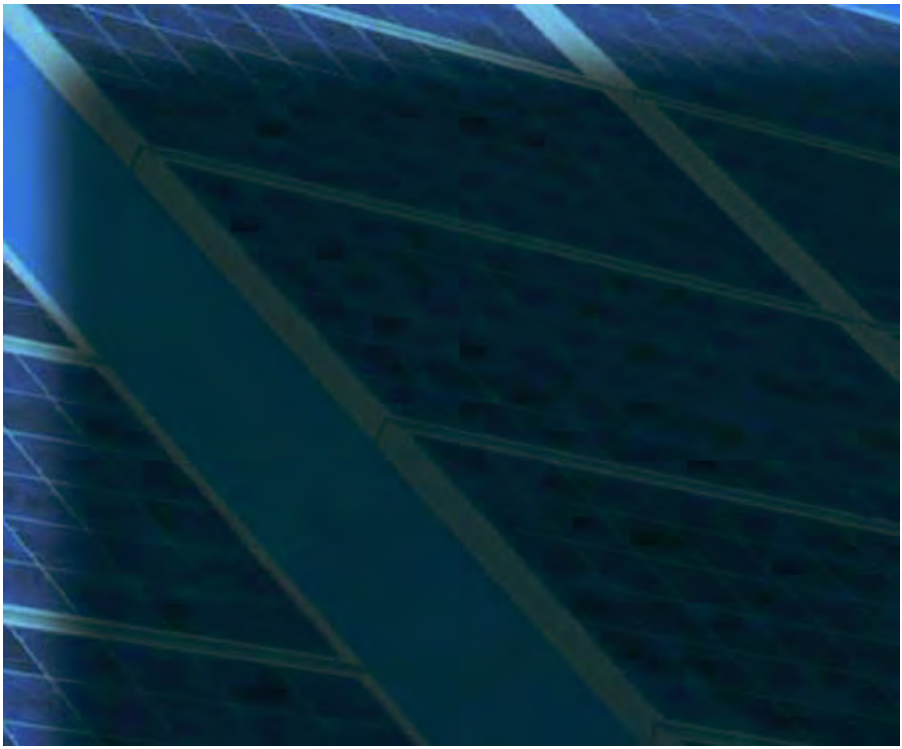
16. Un objeto que absorbe bien energía también

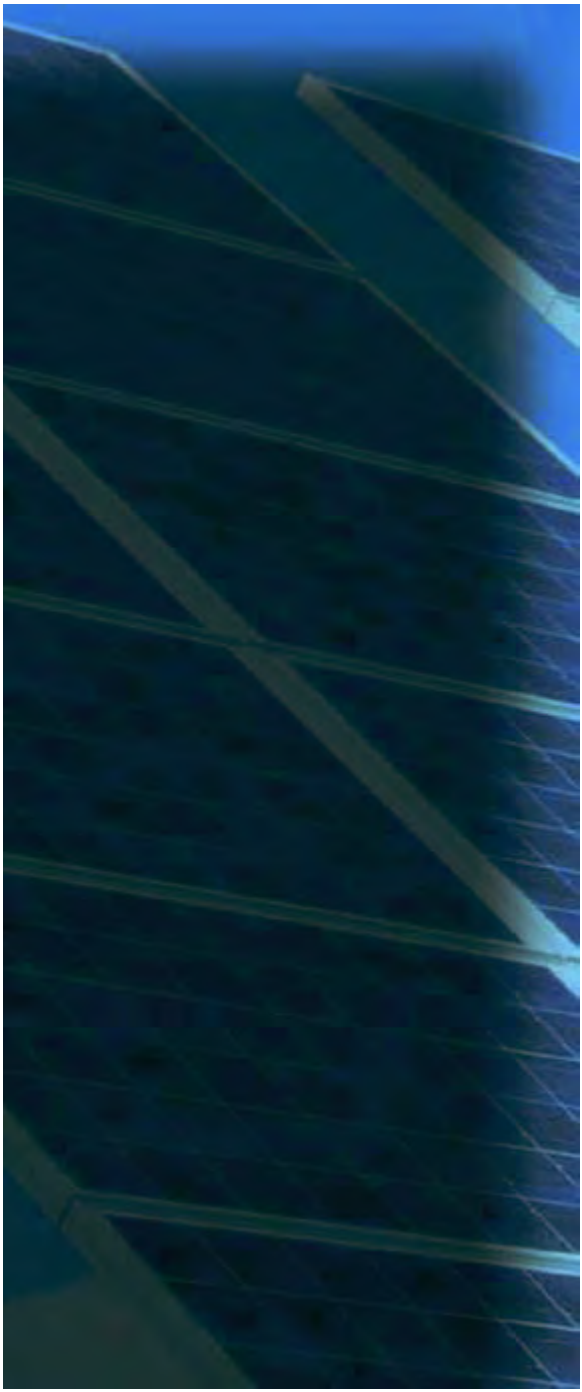
(a) conduce bien.

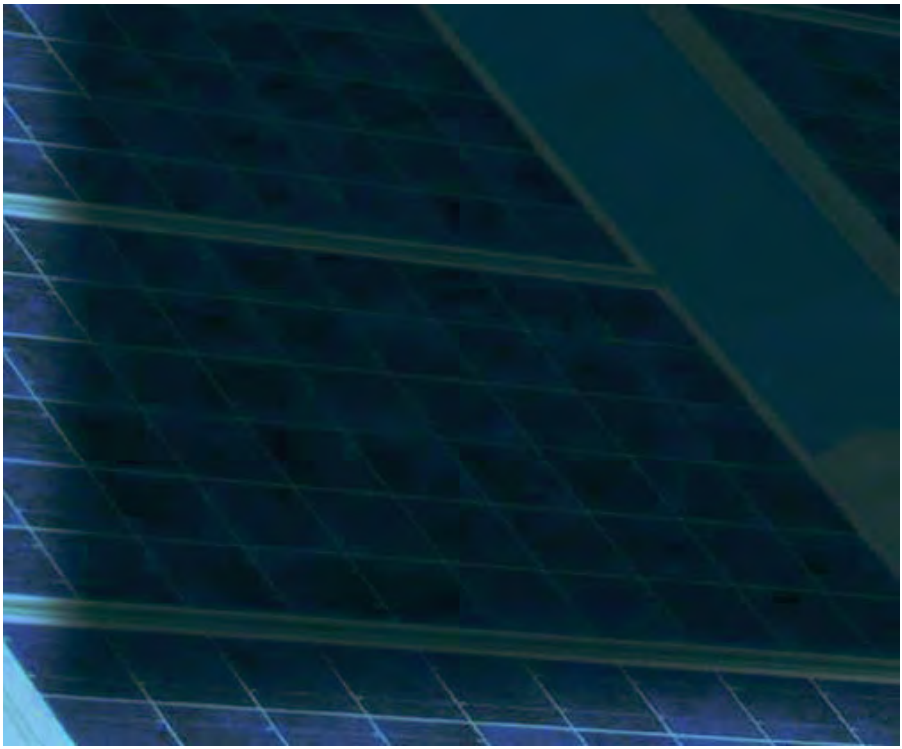
(c) radia bien.

Después de hacer elecciones razonadas, y discutirlas con tus amigos, (b) tiene buena convección. (d) Ninguno de éstos.

encuentra las respuestas en la página S-1.





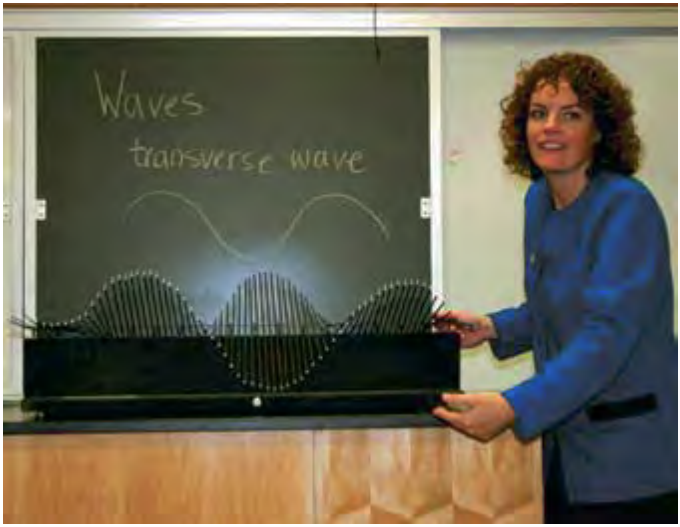


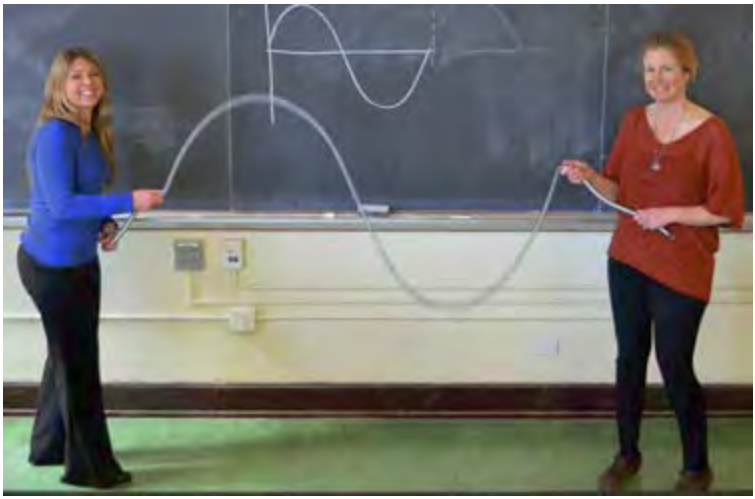
P A R T E C U A T R O

Sonido

Las cerdas de mi arco frotan contra las cuerdas del cel o y las ponen a vibrar a una frecuencia que depende de su masa, tensión y la parte que puedo controlar con mis dedos, que es su longitud. La vibración de las cuerdas fuerza con suavidad vibraciones de frecuencias iguales en el cuerpo de madera, y las vibraciones no paran ahí. La vibración de la madera

produce vibraciones en el aire circundante que transporta el sonido de la música hacia los tímpanos de mis escuchas. ¡Es exquisita la física de la música!





19 ***1***

C A P Í T U L O 1 9

Vibraciones ***2***

y ondas

3

19.1 Buenas vibraciones

19.2 Descripción de ondas

19.3 Movimiento ondulatorio

19.4 Rapidez de ondas

19.5 Interferencia de ondas

4

19.6 Efecto Doppler

19.7 Ondas de proa

19.8 Ondas de choque

5

1 *Diane Reindeau muestra a sus alumnos cómo se gene-*

ran ondas mediante vibraciones en un demostrador de ondas

didáctico. ***2*** *Frank Oppenheimer, en el Exploratorium de San Francisco, muestra el rastro en línea recta que deja la lenteja de un péndulo que se balancea y suelta arena sobre una banda transportadora estacionaria.* ***3*** *Cuando la banda transportadora se mueve con movimiento uniforme, se traza una curva sinusoidal.*

4 *Jill Johnsen y Diane Lininger Markham producen ondas*

transversales. ***5*** *Cantor, compositor y profesor de química, John Suchocki produce vibraciones armoniosas.*

internacionales de física que recibió, a Frank se le prohibió

practicarla. Sin embargo, se le permitió cuidar ganado e

El Exploratorium de San Francisco no sólo es un

museo de ciencia y tecnología de clase mundial,

también es quizás el mejor lugar del planeta Tierra

impartir ciencia general en la Pagosa Springs High School,

para impartir una clase de física. Tuve el honor de hacer

en Colorado. Frank también dijo que, por si fuera poco,

esto en los años 1982-2000. El Exploratorium es especial

agentes del gobierno advirtieron a sus vecinos que vigila-

gracias a su fundador, Frank Oppenheimer, el hermano

ran sus potenciales "actividades antiestadounidenses".

menor del más famoso J. Robert Oppenheimer, director

Frank dedicó el resto de su vida a exponer al público

del laboratorio Los Álamos durante la Segunda Guerra general las maravillas de la ciencia, lo que culminó en el Mundial. La pasión de Frank por hacer física sólo es Exploratorium de San Francisco. A él dediqué la quinta superada por la pasión con que la enseña. Tuve el enorme

edición de mi Física conceptual. Antes de su muerte, en

privilegio de compartir mi salón de clase con él con el 1985, Frank aportó este texto, que utilicé como párrafo tema de vibraciones, ondas y sonidos musicales. Recuer-de apertura del libro:

do que, después de una de sus brillantes presentaciones,

“Cuando tratamos de entender el mundo natural que

me preguntó con discreción qué me había parecido. Casi

nos rodea, ganamos confianza en nuestra capacidad

con llanto le respondí: “Estu-

de decidir en quién confiar y también en qué creer

viste magnífico”. Porque era

sobre otros temas. Sin esta confianza, será inevitable

verdad. Además de sus grandio-

que las decisiones que tomemos sobre asuntos socia-

sas explicaciones de la física, él

les, políticos y económicos se basen por completo en

mismo emanaba una grandeza

una muy atractiva mentira que alguien más nos diga.

personal: con su insistencia en

Por tanto, valorar las observaciones y descubrimien-

la excelencia, su falta de preten-

tos tanto de científicos como de artistas sirve no sólo

sión y su respeto por la inventiva

para nuestro deleite, sino también para ayudarnos a

y el juego, y por sus estudiantes.

tomar decisiones más satisfactorias y válidas, y para

En mi experiencia, Frank fue

encontrar mejores soluciones a nuestros problemas

un profesor muy querido.

individuales y sociales."

Frank Oppenheimer fue víctima de la persecución

política de la década de 1950, cuando admitió pertenecer

El motivo principal de Frank para fundar el Explo-

al Partido Comunista de Estados Unidos durante lo más

ratorium fue estimular a las personas y motivarlas a

profundo de la Gran Depresión, junto con muchos otros

hacer las cosas por ellas mismas y a pensar por ellas

ciudadanos idealistas que eran conscientes de la alta tasa

mismas, una forma de enseñar que ahora está muy

de desempleo de la nación durante aquella época. Frank

difundida. En 2013, el Exploratorium se mudó del

me dijo que, después de rehusarse a dar los nombres de

Palace of Fine Arts en San Francisco, al cercano Pier

otros miembros al Comité de Actividades Internas Anti-

15. Me da mucho gusto anunciar que el nuevo y más

estadounidenses, fue acosado por el FBI. A pesar de sus

grande Exploratorium tiene todo el encanto y la buena

impresionantes logros en física y a pesar de los premios

energía que Frank otorgó al Exploratorium original.

***19.1** Buenas vibraciones*

En un sentido general, todo lo que se mueve de ida y vuelta, atrás y adelante, de lado a lado, adentro y afuera, o arriba y abajo, está vibrando. Una vibración es un meneo Para saber más de Oppenheimer,

periódico en el tiempo. Un meneo periódico tanto en el espacio como en el tiempo lee Something Incredibly Won-es una onda. Una onda se extiende de un lugar a otro. La luz y el sonido son ambas derful Happens: Frank Oppenhei-vibraciones que se propagan por el espacio como ondas, pero dos tipos de ondas muy mer and the World He Made Up

(Algo increíblemente maravilloso

diferentes. El sonido es una onda mecánica, la propagación de la vibración a través de sucede: Frank Oppenheimer y el

un medio material: un sólido, un líquido o un gas. Si no hay un medio material para mundo que construyó), de K. C.

vibrar, entonces el sonido no es posible. El sonido no puede viajar en el vacío. Pero la Cole (Boston: Houghton Mifflin

luz sí puede porque, como aprenderás en capítulos posteriores, la luz es una vibración Harcourt, 2009).

de campos eléctricos y magnéticos: una onda electromagnética de energía pura. Si bien la luz puede pasar a través de muchos materiales, no necesita de ninguno. Esto es evidente cuando se propaga a través del vacío entre el Sol y la Tierra. La fuente de todas las ondas —mecánicas o electromagnéticas— es algo que vibra. Para comenzar el estudio de las vibraciones y las ondas se estudiará el movimiento de un péndulo simple.

PA R T E CUAT RO SO N I DO

Vibración de un péndulo

Si suspendes una piedra en el extremo de una cuerda, tienes un péndulo simple. Lo mismo sucede con un recipiente lleno de arena suspendido en el

extremo de un poste vertical que se balancea de ida y vuelta. En las fotografías al inicio del capítulo, Frank Oppenheimer muestra cómo la arena que cae de un péndulo como éstos traza una línea recta sobre una banda transportadora estacionaria y, luego, cuando la banda se mueve con rapidez constante, produce una curva especial conocida como curva sinusoidal. Una ***curva sinusoidal*** *es una representación gráfica de una onda producida por un movimiento armónico simple.1*

Los péndulos se balancean de ida y vuelta con tal regularidad que, durante mucho tiempo, se utilizaron para controlar el movimiento de la mayoría de los relojes. Todavía se pueden encontrar en los relojes de pie y los relojes cucú. Galileo descubrió que el tiempo que un péndulo tarda en balancearse de ida y vuelta pequeñas distancias sólo depende de la longitud del péndulo.2 El tiempo de un balanceo de ida y vuelta, llamado periodo, no depende ni de la masa del péndulo ni del tamaño del arco a través del que se balancea.

F I G U R A 1 9 . 1

Si sueltas dos bolas de diferentes masas,

aceleran a g. Deja que se deslicen sin

fricción por un plano inclinado y se

deslizan juntas a la misma fracción de

g. Amárralas a cuerdas de la misma

longitud de modo que sean péndulos, y

se balancean de ida y vuelta al unísono.

En todos los casos, los movimientos son

independientes de la masa.

Un péndulo largo tiene un periodo más largo que un péndulo corto; esto es: se balancea de ida y vuelta con menos frecuencia que un péndulo corto. El péndulo de un reloj de pie, con una longitud de aproximadamente 1 metro, por ejemplo, se balancea En 1848, Jean Foucault diseñó un

con un periodo pausado de 2 segundos, en tanto que el péndulo mucho más corto de péndulo muy largo que, cuando se

un reloj cucú se balancea con un periodo que es de menos de un segundo. Además balancea, parece cambiar de dirección durante el día. En realidad,

la

de la longitud, el periodo de un péndulo depende de la aceleración debida a la gra-Tierra gira por debajo del péndulo.

vedad. Los buscadores de petróleo y minerales utilizan péndulos muy sensibles para detectar diferencias leves en esta aceleración, que es afectada por las densidades de las formaciones subterráneas.

***19.2** Descripción de ondas*

Una curva sinusoidal también puede trazarse con una lenteja unida a un resorte que experimente movimiento armónico simple vertical (Figura 19.2). Como se mencionó, una curva seno es una representación gráfica de una onda. Al igual que con una onda ***SCREENCAST:***

en el agua, los puntos altos de una onda sinusoidal se llaman crestas y los puntos bajos ***Buenas vibraciones y ondas***

1La condición para el movimiento armónico simple es que la fuerza restauradora sea proporcional al desplazamiento desde el equilibrio. Esta condición se cumple, al menos de manera aproximada, en la mayoría de las vibraciones. La componente del peso que restaura un péndulo desplazado a su posición de equilibrio es directamente proporcional al desplazamiento del péndulo (en los ángulos pequeños); lo mismo sucede con una lenteja unida a un resorte. Recuerda, del Capítulo 12, que la ley de Hooke para un resorte es F 5 k D x, donde la fuerza para estirar (o comprimir) un resorte es directamente proporcional a la distancia estirada (o comprimida).

2La ecuación para el periodo de un péndulo simple para arcos pequeños es T

L

= 2

g , donde T es el periodo,

L es la longitud del péndulo y g es la aceleración debida a la gravedad.

C A PÍ T U LO 19 V I B R ACI O N ES Y O N DA S

359

F I G U R A 1 9 . 2

Longitud de onda

Cuando la lenteja vibra arriba y abajo,

una plumilla marcadora traza una curva

Amplitud

sinusoidal sobre el papel que se mueve

horizontalmente con rapidez constante.

Longitud de onda

se llaman valles. La línea recta punteada en la figura representa el punto medio de la vibración, la posición de equilibrio. El término ***amplitud*** *se refiere a la distancia entre el punto medio y la cresta (o el valle) de la onda. De modo que la amplitud es igual al desplazamiento máximo desde el equilibrio.*

La ***longitud de onda*** *de una onda es la distancia de la parte superior de una cresta a la parte superior de la siguiente cresta. O, lo que es lo mismo, la longitud de onda es la distancia entre cualesquiera partes sucesivas idénticas de la onda. Las longitudes de onda de las olas en la playa se miden en metros, las longitudes de onda de las ondulaciones en un estanque se miden en centímetros y las longitudes de onda de la luz se miden en mil millonésimas de metro (nanómetros).*

Qué tan a menudo ocurre una vibración se describe mediante su ***frecuencia****. La frecuencia de un péndulo que vibra, o de un objeto sobre un resorte, especifica el número de vibraciones de ida y vuelta que realiza en un tiempo dado (por lo general, La frecuencia de una onda "clásica" (como una onda sonora, una*

1 segundo). Una oscilación completa de ida y vuelta es una vibración. Si una vibración ola o una onda de radio) coincide

ocurre en 1 segundo, la frecuencia es de una vibración por segundo. Si dos vibraciones con la frecuencia de su fuente

transcurren en 1 segundo, la frecuencia es de dos vibraciones por segundo.

de vibración. (En el mundo cuán-

La unidad de frecuencia se llama ***hertz*** *(Hz), en honor a Heinrich Hertz, quien tico de los átomos y fotones, las*

demostró las ondas de radio en 1886. Una vibración por segundo es 1 hertz, dos vibra-reglas son diferentes.)

ciones por segundo es 2 hertz y así sucesivamente. Las frecuencias más altas se miden en kilohertz (kHz, miles de hertz) y las frecuencias todavía más altas en megahertz (MHz, millones de hertz) o gigahertz (GHz, miles de millones de hertz). Las ondas de radio AM se miden en kilohertz, y las ondas de radio FM se miden en megahertz; el radar y los hornos de microondas funcionan en frecuencias de gigahertz. Una estación a 960 kHz en el sintonizador de radio AM, por ejemplo, transmite ondas de radio que tienen una frecuencia de 960,000 vibraciones por segundo. Una estación a 101.7 MHz en el sintonizador FM transmite ondas de radio con una frecuencia de 101,700,000

hertz. Dichas frecuencias de ondas de radio son las frecuencias a las que los electrones se fuerzan a vibrar en la antena de la torre de transmisión de una estación de radio.

Como puedes ver, la fuente de todas las ondas es algo que vibra. La frecuencia de la fuente en vibración y la frecuencia de la onda que produce son la misma.

El ***periodo*** *de una vibración u onda es el tiempo de una vibración completa. Si se conoce la frecuencia de un objeto, entonces puede calcularse su periodo, y viceversa.*

Supón, por ejemplo, que un péndulo realiza dos vibraciones en 1 segundo. Su frecuen- ***F I G U R A 19. 3***

cia es 2 Hz. El tiempo necesario para completar una vibración —esto es: el periodo Los electrones en la antena de transmi-de vibración— es 1/2 segundo. O, si la frecuencia de vibración es de 3 Hz, entonces el sión vibran 940,000 veces cada segundo periodo es 1/3 segundo. La frecuencia (vibraciones por segundo) y el periodo (segun- y producen ondas de radio a 940 kHz.

dos por vibración) son recíprocos:

$$\text{Frecuencia} = \frac{1}{\text{periodo}}$$

o, viceversa,

$$\text{periodo} = \frac{1}{\text{Frecuencia}}$$

Periodo = frecuencia

360

PA R T E CUAT RO SO N I DO

P U N T O D E C O N T R O L

1. Un cepillo de dientes eléctrico completa 90 ciclos cada segundo. ¿Cuáles son (a) su frecuencia y (b) su periodo?

2. Soplan ráfagas de viento que hacen que la Torre Willis de Chicago se balancee de ida y vuelta y complete un ciclo en 10 s. ¿Cuáles son (a) su frecuencia y (b) su periodo?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *(a) 90 ciclos por segundo es 90 Hz; (b) 1/90 s.*

2. *(a) 1/10 Hz; (b) 10 s.*

19.3 *Movimiento ondulatorio*

La mayor parte de la información de tu entorno llega en forma de ondas. Es con el movimiento de las ondas que los sonidos se transportan hasta tus oídos, la luz hasta tus ojos y las señales electromagnéticas hasta tu radio y tu teléfono inalámbrico. Mediante Numerosos fanáticos en un

el movimiento ondulatorio, la energía puede transferirse de una fuente a un receptor sin concierto o estadio "hacen la

la transferencia de materia entre los dos puntos.

ola" al levantarse de sus asientos,

balancear los brazos hacia lo alto

Para entender mejor el movimiento ondulatorio hay que considerar primero el caso y luego sentarse de nuevo en sus

sencillo de una soga estirada en sentido horizontal. Si un extremo de dicha soga se asientos... todo en una secuencia

sacude hacia arriba y hacia abajo, una perturbación rítmica viaja por toda la soga.

adecuada.

Cada partícula de la soga se mueve hacia arriba y hacia abajo, mientras que, al mismo tiempo, la perturbación se mueve a lo largo de la longitud de la soga. El medio, la soga o lo que sea, regresa a su condición inicial después de que pasó la perturbación. Lo que se propaga es la perturbación, la energía del movimiento ondulatorio, no el medio en sí.

Quizás un ejemplo más familiar de movimiento ondulatorio es una

onda en el agua. Si se suelta una piedra en un estanque tranquilo, las ondas viajan hacia afuera en círculos que se expanden, cuyos centros están en la fuente de la perturbación. En este caso, puedes pensar que el agua se transporta con las ondas, pues el agua se salpica hacia terreno antes seco cuando las olas llegan a la orilla. Sin embargo, debes darte cuenta de que, si encuentra obstáculos, el agua fluirá de vuelta hacia el estanque y las cosas serán en gran medida como eran al principio. La superficie del agua se perturbará, pero el agua en sí no irá a ninguna parte. Una hoja sobre la

superficie se bamboleará hacia arriba y hacia abajo y se moverá de ida ***F I G U R A 1 9 . 4***

y vuelta, conforme la ola pase, pero la hoja terminará donde comenzó.

Ondas en el agua.

De nuevo, el medio regresa a su condición inicial después de que pasó la perturbación, incluso en el caso extremo de un tsunami.

El siguiente es otro ejemplo de onda que ilustra que lo que se transporta de una posición a otra es una perturbación en un medio, no el medio en sí. Si ves un campo de pasto alto desde una posición elevada en un día ventoso, verás ondas que viajan a través Las ondas mecánicas necesitan un

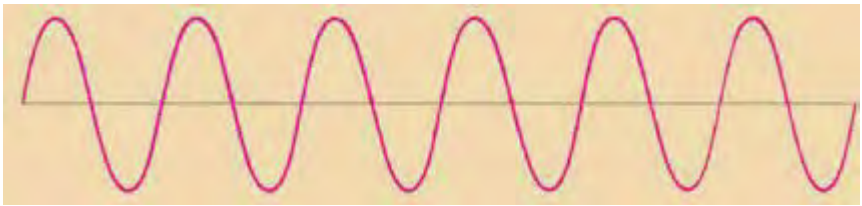
del pasto. Ningún tallo del pasto abandona su lugar; más bien, todos se balancean de medio. Un Slinky necesita sus espiras; las olas del océano necesitan

ida y vuelta. Es más, si estás de pie sobre un sendero estrecho, el pasto que sopla sobre agua; el sonido de un clarín nece-el borde del sendero y cepilla tus piernas se parece mucho al agua que moja la orilla sita aire; "la ola" en un estadio

en el ejemplo anterior. Mientras continúe el movimiento ondulatorio, el pasto alto se necesita fanáticos exuberantes.

balancea de ida y vuelta y vibra entre límites definidos, pero no va a ninguna parte.

Cuando el movimiento ondulatorio se detiene, el pasto regresa a su posición inicial.



PRACTICANDO LA FÍSICA

Aquí tienes una curva sinusoidal que representa una onda transversal. Con una regla, mide la longitud de onda y la amplitud de la onda.

Longitud de onda

Amplitud

Ondas transversales

Amarra el extremo de una soga a una pared y sostén el extremo libre en tu mano. Si en forma súbita sacudes el extremo libre hacia arriba y hacia abajo, un pulso viajará por toda la soga y regresará (Figura 19.5). En este caso, el movimiento de la soga (flechas arriba y abajo) está en ángulos rectos con respecto a la dirección de la rapidez ***SCREENCAST:***

de la onda. El movimiento en ángulo recto, o lateral, se llama movimiento

transversal.

Tipos de ondas

Ahora sacude la soga con un movimiento regular continuo hacia arriba y hacia abajo, y la serie de pulsos producirá una onda. Dado que el movimiento del medio (la soga, en este caso) es transversal a la dirección en la que viaja la onda, este tipo de onda se llama ***onda transversal****.*

F I G U R A 1 9 . 5

Una onda transversal.

Las ondas en las cuerdas estiradas de los instrumentos musicales son transversales.

VIDEO:

Más adelante verás que las ondas electromagnéticas, que constituyen las ondas de ra-Ondas longitudinales y transversales

dio y la luz, también son transversales.

Ondas longitudinales

No todas las ondas son transversales. En ocasiones, las partes que constituyen un medio se mueven de ida y vuelta en la misma dirección en la que viaja la onda. El movi-El sonido necesita un medio. No

miento es a lo largo de la dirección de la onda en lugar de en ángulo recto con respecto puede viajar en un vacío porque

a ella. Esto produce una ***onda longitudinal****.*

no hay nada que comprimir y

Tanto una onda transversal como una onda longitudinal pueden demostrarse con estirar.

un resorte o un Slinky estirado, como se muestra en la Figura 19.6. Se produce una (a)

F I G U R A 1 9 . 6

Ambas ondas transfieren energía de

Longitud

izquierda a derecha. (a) Cuando el

de onda

extremo del Slinky se empuja y jala de

manera rápida a lo largo de su longitud,

(b)

se produce una onda longitudinal. (b)

Cuando se sacude hacia los lados, se

produce una onda transversal.

Sitio del terremoto

onda transversal cuando se sacude el extremo de un Slinky de lado a lado en una dirección perpendicular al Slinky. Se crea una onda longitudinal cuando jalas y empujas el extremo del Slinky hacia y desde ti en una dirección paralela al Slinky. En este caso, P

se ve que el medio vibra paralelo a la dirección de transferencia de energía. Parte del S

S

Slinky se comprime y una onda de compresión viaja a lo largo del resorte. Entre comP

presiones sucesivas hay una región estirada, llamada rarefacción. Tanto compresiones S

Manto

como rarefacciones viajan en la misma dirección por el Slinky. Las ondas sonoras son Núcleo interior

ondas longitudinales.

P

sólido

Las ondas generadas por los terremotos y que viajan en el suelo son de dos tipos Núcleo

P

principales: las ondas longitudinales P y las ondas transversales S. [Los estudiantes de exterior líquido

P

geología con frecuencia recuerdan las ondas P como ondas "push-pull" (empujar-jalar) más rápidas y las ondas S como ondas "side-to-side" (lado a lado) más lentas.] Las ***F I G U R A 1 9 . 7***

ondas S no pueden viajar a través de materia líquida, pero las ondas P pueden viajar a Ondas P y S generadas por un

través tanto de las partes fundidas como de las partes sólidas del interior de la Tierra.

terremoto.

El estudio de estas ondas revela mucho del interior de la Tierra.

La longitud de onda de una onda longitudinal es la distancia entre compresiones sucesivas o, dicho de otro modo, la distancia entre rarefacciones sucesivas. El ejemplo más común de ondas longitudinales es el sonido en el aire. Los elementos del aire vi-Las ondas sobre la superficie del

bran de ida y vuelta en torno a alguna posición de equilibrio a medida que las ondas se agua son híbridos transversales

mueven. En el Capítulo 20 se abordarán en detalle las ondas sonoras.

longitudinales: el agua se mueve

en bucles, hacia arriba y hacia

abajo, así como de ida y vuelta. Y

como con otras ondas, el medio no

19.4

realiza un avance neto en la direc-

Rapidez de ondas

ción de propagación de la onda.

La rapidez del movimiento ondulatorio periódico se relaciona con la frecuencia y la longitud de onda de las ondas. Para entender esto, piensa que ves desde arriba el caso simple de las olas (Figura 19.8). Imagina que fijas los ojos en un punto estacionario Longitud de onda

sobre la superficie del agua y observas las olas que pasan por este punto. Puedes medir cuánto tiempo transcurre entre la llegada de una cresta y la llegada de la siguiente (el periodo) y también observar la distancia entre las crestas (la longitud de onda). Sabes que la rapidez se define como la distancia dividida entre el tiempo. En este caso, la distancia es una longitud de onda y el tiempo es un periodo, de modo que la ***rapidez de onda*** *5 longitud de onda/periodo.*

Por ejemplo, si la longitud de onda es de 1.5 m y el tiempo entre crestas en un punto sobre la superficie es de 0.5 s, entonces la onda se mueve 1.5 m en 0.5 s y su rapidez es 1.5 m dividido entre 0.5 s o 3 m/s. Dado que el periodo es el inverso de la frecuencia, la fórmula rapidez de onda 5 longitud de onda/periodo también puede escribirse como: ***F I G U R A 1 9 . 8***

Vista superior de las ondas en el agua.

Rapidez de onda 5 frecuencia 3 longitud de onda

Cada círculo azul representa una cresta

Esta relación es válida en todos los tipos de ondas, se trate de olas, ondas sonoras u del patrón ondulatorio que se expande.

A estas líneas de cresta se les llama

ondas luminosas.

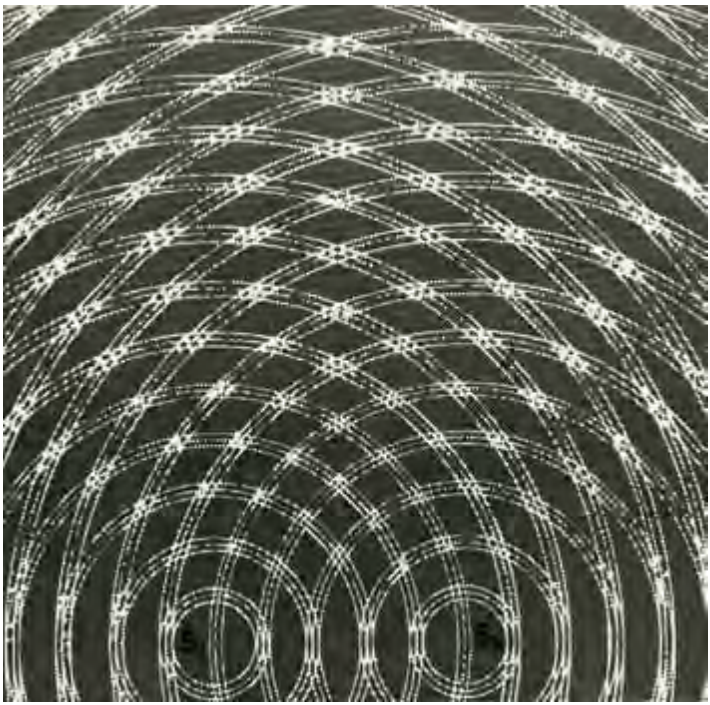
frentes de onda.

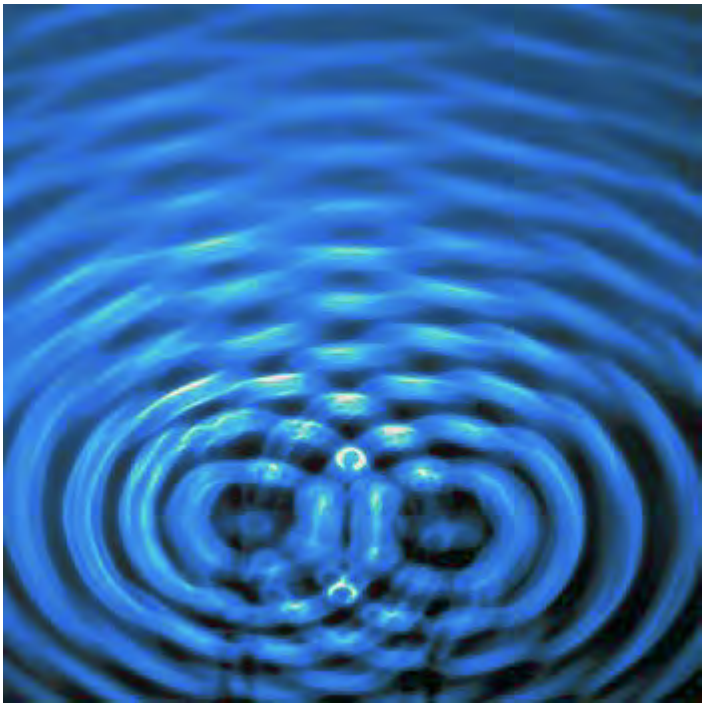
$v = 1\ m/s$

1 m

F I G U R A 1 9 . 9

Si la longitud de onda es 1 m, y una longitud de onda por segundo pasa por el poste, entonces la rapidez de la onda es 1 m/s.





C A PÍ T U LO 19 V I B R ACI O N ES Y O N DA S

363

P U N T O D E C O N T R O L

1. Si un tren de vagones de carga, cada uno de 10 m de largo, rueda a tu *La rapidez v de una onda se puede*

lado a la tasa de tres vagones cada segundo, ¿cuál es la rapidez del tren?

expresar con la ecuación v 5 f,

2. Si una ola oscila hacia arriba y hacia abajo tres veces cada segundo, y la *donde f es la frecuencia de la onda*

y (letra griega lambda minúscula)

distancia entre las crestas de la ola es 2 m, ¿cuál es su frecuencia? ¿Cuál *es la longitud de onda de la onda.*

es su longitud de onda? ¿Cuál es su rapidez de onda?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *30 m/s. Puedes ver esto en dos formas. (a) De acuerdo con la definición de rapidez del Capítulo 2, v 5 d/t 5 (3 3 10 m)/1 s 5 30 m/s, pues 30 m de tren pasan junto a ti en 1 s. (b) Si comparas el tren con el movimiento ondulatorio, donde la longitud de onda corresponde a 10 m y la frecuencia es 3 Hz, entonces rapidez 5 frecuencia 3 longitud de onda 5 3 Hz 3 10 m 5 3/s 3 10 m 5 30 m/s. (Observa que 3 Hz es 3 ciclos en 1 s, o simplemente 3/s, porque los ciclos, que sólo son una cuenta, no necesitan escribirse en la unidad para frecuencia.)*

2. *La frecuencia de la ola es 3 Hz, su longitud de onda es 2 m y su rapidez de onda 5*

frecuencia 3 longitud de onda 5 3/s 3 2 m 5 6 m/s.

19.5 *Interferencia de ondas*

Mientras que un objeto material como una roca no puede compartir su espacio con otra roca, más de una vibración u onda sí pueden existir al mismo tiempo en el mismo espacio. Si sueltas dos rocas en el agua, las ondas producidas por cada una pueden Reforzamiento

encontrarse y producir ***interferencia de ondas****. El traslape de ondas puede formar un* ***patrón de interferencia****. Dentro del patrón, los efectos ondulatorios pueden aumentar, disminuir o neutralizarse.*

Cuando más de una onda ocupa el mismo espacio al mismo tiempo, los desplazamientos se suman en todo punto. Éste es el principio de superposición. De modo que, cuando la cresta de una onda se traslapa con la cresta de otra, sus efectos individuales se suman para producir una onda de amplitud aumentada. A esto se le llama interfe-Cancelación

rencia constructiva (Figura 19.10). Cuando la cresta de una onda se traslapa con el valle de otra, sus efectos individuales se reducen. La parte alta de una onda tan sólo llena la parte baja de la otra. A esto se le llama interferencia destructiva.

F I G U R A 1 9 . 1 0

La interferencia de ondas se aprecia mejor en el agua. En la Figura 19.11 se ve el pa- Interferencias constructiva y destructiva trón de interferencia que se forma cuando dos objetos que vibran tocan la superficie del de una onda transversal.

F I G U R A 1 9 . 1 1

Dos conjuntos de ondas en el agua que

se traslapan producen un patrón de

interferencia. La imagen izquierda es

un dibujo idealizado de las ondas que

se expanden a partir de dos fuentes. La

imagen derecha es una fotografía de un

patrón de interferencia real.

agua. Puedes ver las regiones donde una cresta de una onda se traslapa con el valle de otra para producir regiones de amplitud cero. En los puntos a lo largo de dichas regiones, las ondas llegan sin ritmo. Se dice que están fuera de fase una con respecto a la otra.

La interferencia es característica de todo movimiento ondulatorio, ya sea que las ondas sean olas, ondas sonoras u ondas luminosas. La interferencia del sonido se abordará en el Capítulo 20, y la interferencia de la luz en el Capítulo 29.

Ondas estacionarias

Si amarras una soga a una pared y sacudes el extremo libre hacia arriba y hacia abajo, produces un tren de ondas en la soga. La pared es muy rígida para sacudirse, así que las ondas se reflejan de vuelta a lo largo de la soga. Si sacudes la soga del modo correcto, puedes hacer que las ondas incidente y reflejada formen una ***onda estacionaria****, donde partes de la soga, llamadas nodos, parecen quedarse quietas. Los nodos son las regiones de desplazamiento mínimo o cero, con energía mínima o cero. Por el contrario, los antinodos (no indicados en la Figura 19.12) son las regiones de desplazamiento máximo y energía máxima. Puedes poner los dedos justo arriba y abajo de los nodos y la soga no los tocará. Otras partes de la soga, en especial los antinodos, harían contacto con tus dedos. Los antinodos ocurren a medio camino entre los nodos.*

F I G U R A 1 9 . 1 2

Onda incidente

Las ondas incidente y reflejada inter-

fieren en la producción de una onda

estacionaria.

Nodo

En fase

(punto nulo)

Onda reflejada

Onda incidente

Nodo

Fuera

de fase

Onda reflejada

Onda incidente

Nodo

Onda reflejada

En fase

Las ondas estacionarias son resultado de la interferencia (y, como verás en el Capítulo 20, de la resonancia). Cuando dos conjuntos de ondas de igual amplitud y longitud de onda pasan una a través de la otra en direcciones opuestas, las ondas están constantemente en fase y fuera de fase unas con otras. Esto ocurre con una onda que se refleja sobre sí misma. Se producen regiones fijas de interferencia constructiva y destructiva.

Es fácil producir ondas estacionarias. Amarra una soga (o, mejor, una banda de caucho) a un soporte firme. Sacude la banda hacia arriba y hacia abajo con la mano.

Si sacudes la banda con la frecuencia correcta, establecerás una onda estacionaria, como se muestra en la Figura 19.13a). Sacude la banda con el doble de frecuencia y resultará una onda estacionaria con la mitad de la longitud de onda anterior, que tiene dos bucles (Figura 19.13b). (La distancia entre nodos sucesivos es media longitud de onda; dos bucles constituyen una longitud de onda completa.) Si triplicas la frecuencia,

resultará una onda estacionaria con un tercio de la longitud de onda original, que tiene tres bucles (Figura 19.13c), y así sucesivamente.

F I G U R A 1 9 . 1 3

(a) Sacude la soga hasta que origines una

onda estacionaria de un segmento

(a)

(½ de longitud de onda).

(b) Sacude con el doble de frecuencia y

produces una onda con dos segmentos

(1 longitud de onda).

(c) Sacude con tres veces la frecuencia y

produces tres segmentos (1½ longitudes

de onda).

(b)

(c)

Las ondas estacionarias se producen en las cuerdas de los instrumentos musicales cuando se pulsan, se tocan con un arco o se golpean. Se producen en el aire en un tubo de órgano, una trompeta o un clarinete y el aire de una botella de gaseosa cuando se Un tubo de órgano o una flauta

sopla aire sobre su parte superior. Puedes causar ondas estacionarias en una tina de producen sonido mediante ondas

agua o en una taza de café si mueves la tina o la taza hacia atrás y hacia adelante con la estacionarias en una columna de

frecuencia correcta. Las ondas estacionarias pueden producirse con vibraciones trans-aire.

versales o longitudinales.

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Es posible que una onda cancele otra onda de modo que no permanezca ninguna amplitud en ciertos puntos?

2. Supón que estableces una onda estacionaria de tres segmentos, como se muestra en la Figura 19.13c. Si sacudes con el doble de

frecuencia,

¿cuántos segmentos de onda ocurrirán en tu nueva onda estacionaria?

¿Cuántas longitudes de onda?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Sí. A esto se le llama interferencia destructiva. En una onda estacionaria en una soga, por ejemplo, partes de la soga no tienen amplitud: los nodos.*

F I G U R A 1 9 . 1 4

2. *Si impartes el doble de frecuencia a la soga, producirás una onda estacionaria Satchmo produce ondas estacionarias de*

con el doble de segmentos, de modo que tendrás seis segmentos. Puesto que sonido en su trompeta.

una longitud de onda completa tiene dos segmentos, tendrás tres longitudes de onda completas en tu onda estacionaria.

19.6 *Efecto Doppler*

En la Figura 19.15 se muestra un patrón de ondas en el agua producidas por un bi -

A

B

cho que zangolotea sus patas y oscila hacia arriba y hacia abajo en medio de un charco tranquilo. El bicho no va a ninguna parte sino simplemente pisotea el agua en una posición fija. Las ondas que produce son círculos concéntricos, porque la rapidez de onda es la misma en todas direcciones. Si el bicho oscila en el agua con una frecuencia constante, la distancia entre las crestas de la onda (la longitud de onda) es la mis - ***F I G U R A 1 9 .1 5***

ma en todas direcciones. Las ondas encuentran el punto A con tanta frecuencia como Vista superior de las ondas acuáticas formadas por un bicho estacionario

encuentran el punto B. Esto significa que la frecuencia del movimiento ondulatorio es que se zangolotea en agua apacible. Los la misma en los puntos A y B, o en cualquier parte en la vecindad del bicho. Esta fre- círcu

los azules representan frentes de cuencia ondulatoria es la misma que la frecuencia de oscilación del bicho.

onda en el patrón que se expande.

Supón que el bicho en oscilación se mueve a través del agua con una rapidez menor que la rapidez de la onda. En efecto, el bicho alcanza parte de las ondas que produce. El patrón de onda se distorsiona y ya no forma círculos concéntricos (Figura 19.16). El centro de la onda exterior se produjo cuando el bicho estaba en el centro de dicho círculo. El centro de la siguiente onda más chica se produjo cuando el bicho estaba en el centro de dicho círculo y así sucesivamente. Los centros de las ondas Onda 1

circulares se mueven en la dirección del bicho que nada. Aunque el bicho mantiene la Onda 2

misma frecuencia de oscilación que antes, un observador en B vería las ondas llegar Onda 3

con más frecuencia. El observador mediría una mayor frecuencia. Esto se

debe a que Onda 4

cada onda que le sigue tiene una distancia más corta para viajar y en consecuencia A

B

llega a B con más frecuencia a que si el bicho no se moviera hacia B. Un observador 1 2 3 4

en A, por otra parte, mediría una frecuencia menor debido al tiempo más largo entre arribo de crestas de onda. Esto se debe a que, para llegar a A, cada cresta debe viajar más lejos que la antecedente debido al movimiento del bicho. Este cambio de frecuencia debido al movimiento de la fuente (o el receptor) se llama ***efecto Doppler F I G U R A 1 9 . 1 6***

(en honor del científico austriaco Christian Doppler, 1803-1853).

Olas formadas por un bicho que nada en

Las olas se dispersan sobre la superficie plana del agua. Las ondas sonoras y lumi-agua apacible hacia el punto B.

nosas, por otra parte, viajan en espacio tridimensional en todas direcciones, como un globo en expansión. Tal como las ondas circulares están más juntas enfrente del bicho, las ondas sonoras o luminosas esféricas adelante de una fuente en movimiento están más juntas y llegan a un receptor más a menudo.

El efecto Doppler es evidente cuando escuchas el tono cambiante de la sirena de una ambulancia cuando pasa junto a ti. Cuando el vehículo se aproxima, el tono es más alto de lo normal (como una nota más alta en una escala musical). Esto se debe a ***VIDEO:***

que las crestas de las ondas sonoras encuentran tu oído con mayor frecuencia. Y cuan-Efecto Doppler

do el vehículo pasa y se aleja, escuchas una caída en el tono porque las crestas de las ondas golpean tu oído con menor frecuencia.

F I G U R A 1 9 . 1 7

El tono (la frecuencia) del sonido es más

alto cuando una fuente se mueve hacia

ti, y más bajo cuando la fuente se aleja.

El efecto Doppler también ocurre con la luz. Cuando una fuente luminosa se aproxima, hay un aumento en su frecuencia medida; cuando se aleja, hay una disminución en su frecuencia. Al aumento de frecuencia se le llama corrimiento al azul, porque el aumento es hacia el extremo de alta frecuencia (o azul) del espectro de color.

Una disminución de frecuencia se llama corrimiento al rojo, en referencia a un desplazamiento hacia el extremo de menor frecuencia (o rojo) del espectro de color. Las galaxias distantes, por ejemplo, muestran un corrimiento al rojo en la luz que emiten.

Con la medición de este corrimiento se puede calcular su rapidez de retroceso. Una estrella que gira con rapidez muestra luz que corre al rojo desde el lado que se aleja de ti y luz que corre al azul desde el lado que se acerca hacia ti. Esto permite a los astrónomos calcular la tasa de giro de la estrella.

P U N T O D E C O N T R O L

Mientras estás en reposo, una fuente sonora se mueve hacia ti. ¿Tú mides *Ten claridad sobre la diferencia*

la rapidez de su onda sonora como mayor o menor a que si la fuente estu-entre frecuencia y rapidez. Qué tan

viera estacionaria?

frecuentemente vibra una onda es

muy diferente de qué tan rápido

se mueve de un lugar a otro.

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

¡Ninguna de las dos! Tanto la frecuencia como la longitud de onda experimentan un cambio cuando la fuente se mueve, pero no la rapidez de la onda. Ten clara la diferencia entre frecuencia y rapidez.

C A PÍ T U LO 19 V I B R ACI O N ES Y O N DA S

367

19.7 Ondas de proa

Cuando la rapidez de una fuente es tan grande como la rapidez de las ondas que produce, ocurre algo interesante: las ondas se apilan enfrente de la fuente. Considera el bicho del ejemplo anterior cuando nada con la rapidez de la onda. ¿Puedes ver que el bicho alcanzará las ondas que produce? En lugar de que las ondas se muevan adelante del bicho, éstas se superponen y amontonan unas con otras directamente enfrente del bicho (Figura 19.18).

El bicho se mueve justo con el borde frontal de las ondas que produce.

Algo similar ocurre cuando un avión viaja a la rapidez del sonido. En los primeros F I G U R A 1 9 .1 8

días de la aviación jet, se creía que este amontonamiento de ondas sonoras enfrente del Patrón de ondas creado por un bicho avión imponía una "barrera del sonido" y que, con la finalidad de ir más rápido que la que nada a rapidez de onda.

rapidez del sonido, el avión tendría que "romper la barrera del sonido". Lo que en realidad ocurre es que las crestas de onda que se traslapan perturban el flujo de aire sobre las alas, lo que hace más difícil controlar el avión. Pero la barrera no es real. Así como un

bote puede viajar con facilidad más rápido que las ondas que produce, un avión con suficiente potencia viaja fácilmente más rápido que la rapidez del sonido. Entonces se dice que es supersónico. Un avión supersónico vuela en el aire tranquilo y sin perturbaciones porque ninguna onda sonora puede propagarse enfrente de él. De igual modo, un bicho que nada más rápido que la rapidez de las olas siempre se encuentra entrando en el agua con una superficie tranquila sin ondulaciones.

Cuando el bicho nada más rápido que la rapidez de onda, lo ideal es que produzca un patrón de onda, como se muestra en la Figura 19.19. Éste rebasa las ondas que produce. Las ondas se traslapan en los bordes y producen una forma en V, llamada onda de proa, que parece arrastrarse detrás del bicho. La familiar onda de proa generada F I G U R A 19 .19

por un bote de carreras que "rebana" el agua no es una onda oscilatoria típica. Es una Una onda de proa, el patrón producido perturbación producida por el traslape de muchas ondas circulares.

por un bicho que nada más rápido que

En la Figura 19.20 se muestran algunos patrones de onda producidos por fuentes la rapidez de onda. Los puntos donde que se mueven con varias rapideces. Observa que, después de que la rapidez de la fuen- se superponen ondas adyacentes (3) te supera la rapidez de onda, el aumento de rapidez de la fuente produce una forma en producen la forma en V.

V más estrecha.3

(a)

(b)

(c)

(d)

F I G U R A 1 9 . 2 0

Patrones producidos por un bicho que

nada con rapideces cada vez mayores.

El traslape en los bordes sólo ocurre

cuando el bicho nada más rápido que la

v menor que v w

v igual a v w

v supera a v w

v supera mucho a v w

rapidez de onda (v).

w

19.8 Ondas de choque

Un bote de carreras que "rebana" el agua genera una onda de proa bidimensional. Un avión supersónico genera de igual manera una onda de choque tridimensional. Así como la onda de proa se produce por el traslape de círculos que forman una V, una onda de choque se produce por el traslape de esferas que forman un cono. Y, así como la onda de proa de un bote de carreras se dispersa hasta que alcanza la orilla de un lago, la onda cónica generada por un avión supersónico se dispersa hasta que llega al suelo.

La onda de proa de un bote de carreras que pasa junto a ti puede salpicarte y mojar-te si estás en la orilla del agua. En un sentido, puedes decir que eres golpeado por un

"estampido acuático". De la misma forma, cuando el cascarón cónico de aire comprimido que barre detrás de un avión supersónico llega a los escuchas en el suelo, el agudo F I G U R A 1 9 . 2 1

chasquido que escuchan se describe como estampido sónico.

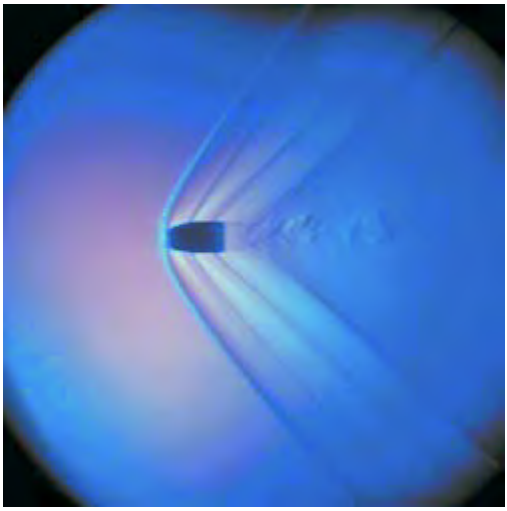
Este avión produce una nube de vapor

de agua que recién se condensó por el

3Las ondas de proa generadas por los botes en el agua en realidad son más complejas de lo que se indica aquí. Se aire en rápida expansión en la región

abordó de un modo ideal para ofrecer una analogía con la producción de las ondas de choque menos complejas rarificada detrás de la pared de aire en el aire.

comprimido.



El estampido sónico no se escucha con un avión que viaja a menor rapidez que el sonido, o subsónico, porque las ondas sonoras que llegan a tus oídos se perciben como un tono continuo. Sólo cuando el avión se mueve más rápido que el sonido, las ondas se traslapan para llegar al escucha en una sola explosión. El súbito aumento de presión en gran medida tiene el mismo efecto que la expansión súbita del aire producido por una explosión. Ambos procesos dirigen un estallido de aire a alta presión hacia el escucha.

El oído se presiona con fuerza para distinguir entre la presión alta de una explosión y la presión alta de muchas ondas traslapadas.

Un esquiador acuático está familiarizado con el hecho de que, junto a la alta cresta de la onda de proa con forma de V, hay una depresión con forma de V. Lo mismo sucede con una onda de choque, que por lo general consiste en dos conos: un cono de F I G U R A 1 9 . 2 2

presión alta generado en la proa del avión supersónico y un cono de presión baja que La bala que viaja más rápido que la

sigue a la cola del avión.4 Los bordes de estos conos son visibles en la fotografía de la rapidez del sonido comprime el aire en

bala supersónica de la Figura 19.22. Entre estos dos conos, la presión del aire se eleva su trayectoria y produce detalles visibles

de la onda de choque.

abruptamente por arriba de la presión atmosférica, luego cae por debajo de la presión atmosférica antes de regresar abruptamente a lo normal más allá del cono de la cola interior (Figura 19.23). Este exceso de presión seguido en forma súbita de una baja presión intensifica el estampido sónico.

Presión

F I G U R A 1 9 . 2 3

En realidad, la onda de choque está

constituida por dos conos: un cono de

F I G U R A 1 9 . 2 4

presión alta, con el ápice en la proa del

Una onda de choque.

avión, y un cono de presión baja, con

el ápice en la cola. Una gráfica de la

A menudo se tiene la idea equivocada de que los estampidos sónicos se producen presión del aire a nivel del suelo entre los

conos adopta la forma de la letra N.

cuando un avión vuela a través de la "barrera del sonido"; esto es, justo cuando el avión sobrepasa la rapidez del sonido. Esto es lo mismo que decir que un bote produce una onda de proa cuando primero supera sus propias ondas. Esto no es así. El hecho es que una onda de choque y su estampido sónico resultante barren en forma continua detrás y abajo de un avión que viaja más rápido que el sonido, tal como una onda de proa barre de manera continua detrás de un bote de carreras. En la Figura 19.25, el escucha B está en el proceso de escuchar un estampido sónico, el escucha C ya lo escuchó y el escucha A lo escuchará dentro de poco. ¡El avión que generó esta onda de choque tal vez rompió la barrera del sonido hace muchos minutos!

No es necesario que la fuente en movimiento sea "ruidosa" para producir una onda de choque. Una vez que un objeto se mueve más rápido que la rapidez del sonido producirá sonido. Una bala supersónica que pasa sobre tu cabeza produce un chasquido, que es un pequeño estampido sónico. Si la bala fuese más grande y perturbara más aire en su trayectoria, el chasquido sería más parecido a un estampido. Cuando un do-mador de leones chasquea un látigo, el sonido del chasquido en realidad es un estampido sónico producido por la punta del látigo cuando viaja más rápido que la rapidez A

B

C

del sonido. Tanto la bala como el látigo no son en sí mismos una fuente de sonido, F I G U R A 1 9 . 2 5

pero, cuando viajan con rapideces supersónicas, producen su propio sonido cuando La onda de choque todavía no llega al

generan ondas de choque.

escucha A, pero ahora llega al escucha B

y ya llegó al escucha C.

4Con frecuencia, las ondas de choque son más complejas e involucran múltiples conos.

C A PÍ T U LO 19 R E V ISI Ó N

369

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)
Curva sinusoidal. La forma de onda trazada por el movimien-
Rapidez de onda. *La rapidez con la que las ondas pasan por un to armónico simple, que puede hacerse visible sobre una*

punto particular:

banda transportadora en movimiento mediante un péndulo

Rapidez de onda 5 frecuencia 3 longitud de onda

que se balancea en ángulos rectos por encima de la banda en

movimiento.

Interferencia de onda. *Fenómeno que ocurre cuando dos*

Amplitud. *Para una onda o vibración, el desplazamiento*

ondas se encuentran mientras viajan por el mismo medio.

máximo a cualquier lado de la posición de equilibrio (el

Patrón de interferencia. *Patrón formado por la superposición punto medio).*

de diferentes conjuntos de ondas que producen un reforza-

Longitud de onda. *Distancia entre crestas, val es o partes idén-miento en algunos lugares y una cancelación en otros.*

ticas sucesivas de una onda.

Onda estacionaria. *Patrón de interferencia estacionario forma-Frecuencia. Para un cuerpo o medio que vibra, el número de*

do en un medio cuando dos conjuntos de ondas idénticas

vibraciones por unidad de tiempo. Para una onda, el número

pasan por el medio en direcciones opuestas.

de crestas que pasan por un punto particular por unidad de

Efecto Doppler. *Corrimiento en la frecuencia recibida debida tiempo.*

al movimiento de una fuente en vibración que se acerca o

Hertz. *La unidad del SI de frecuencia. Un hertz (símbolo Hz) es se aleja de un receptor.*

igual a una vibración por segundo.

Onda de proa. *Perturbación con forma en V creada por un*

Periodo. *Tiempo en el que se completa una vibración. El perio-objeto que se mueve a través de una superficie líquida con*

do de una onda es igual al periodo de la fuente y es igual a

una rapidez mayor que la rapidez de onda.

1/frecuencia.

Onda de choque. *Perturbación con forma de cono creada por*

Onda transversal. *Una onda en la que el medio vibra en una*

un objeto que se mueve con rapidez supersónica a través

dirección perpendicular (en ángulo recto) respecto de la direc-

de un fluido.

ción en la que viaja la onda. Las ondas luminosas y las ondas

Estampido sónico. *Fuerte sonido que resulta de la incidencia en los instrumentos de cuerda son transversales.*

de una onda de choque.

Onda longitudinal. *Una onda en la que el medio vibra en una*

dirección paralela a (a lo largo de) la dirección en la que viaja

la onda. Las ondas sonoras son longitudinales.

PREGUNTAS CONCEPTUALES *(COMPRENSIÓN)*
19.1 Buenas vibraciones

11. En una onda transversal, ¿en qué dirección son las vibracio-

1. ¿Cómo se le llama a un meneo en el tiempo? ¿Cómo llamas

nes, en relación con la dirección de viaje de la onda?

a un meneo en el espacio y el tiempo?

12. En una onda longitudinal, ¿en qué dirección son las vibra-

2. ¿Cuál es la fuente de todas las ondas?

ciones, en relación con la dirección de viaje de la onda?

3. ¿Qué se entiende por el periodo de un péndulo?

13. La longitud de onda de una onda transversal es la distan-

4. ¿Cuál tiene el periodo más largo: un péndulo corto o uno

cia entre crestas (o valles) sucesivas. ¿Cuál es la longitud

largo?

de onda de una onda longitudinal?

19.4 Rapidez de ondas

19.2 Descripción de ondas

5. ¿Cómo se relaciona una curva sinusoidal con la descrip-

14. ¿Cuál es la relación entre la frecuencia, la longitud de

ción de una onda?

onda y la rapidez de onda?

6. Distingue entre estos diferentes aspectos de una onda:

19.5 Interferencia de ondas

periodo, amplitud, longitud de onda y frecuencia.

15. ¿Qué es el principio de superposición?

7. ¿Cuántas vibraciones por segundo se representan en una

16. Distingue entre interferencia constructiva e interferencia

onda de radio de 101.7 MHz?

destructiva.

8. ¿Cuál es la relación entre la frecuencia y el periodo?

17. ¿Qué tipos de ondas pueden mostrar interferencia?

19.3 Movimiento ondulatorio

18. ¿Qué es un nodo? ¿Qué es un antinodo?

9. En una palabra, ¿qué es lo que se mueve de la fuente al

19. ¿Las ondas estacionarias pueden formarse de ondas trans-

receptor en el movimiento ondulatorio?

versales, ondas longitudinales o ambas?

10. ¿El medio donde viaja una onda se mueve con la onda?

19.6 Efecto Doppler

24. ¿Qué tan rápido vuela un avión supersónico en compara-

20. En el efecto Doppler, ¿cambia la frecuencia? ¿Cambia la

ción con la rapidez del sonido?

rapidez de la onda?

25. ¿Cómo es que la forma en V de una onda de proa depende

21. ¿El efecto Doppler puede observarse con ondas longitudi-

de la rapidez de la fuente?

nales, con ondas transversales o con ambas?

19.8 Ondas de choque

22. ¿Qué se entiende por corrimiento al azul y corrimiento al

rojo para la luz?

26. Una onda de proa sobre la superficie del agua es bidimen-

sional. ¿Cómo es una onda de choque en el aire?

19.7 Ondas de proa

27. Verdadero o falso: un estampido sónico sólo ocurre cuando

23. ¿Qué tan rápido debe nadar un bicho para alcanzar las

un avión rompe la barrera del sonido. Defiende tu respuesta.

ondas que produce? ¿Qué tan rápido debe moverse para

28. Verdadero o falso: para que un objeto produzca un estam-

producir una onda de proa?

pido sónico, debe ser "ruidoso". Ofrece dos ejemplos que

apoyen tu respuesta.

***P I E N S A Y R E A L I Z A** (A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 29. Amarra un tubo de caucho, un resorte o una soga a un*

estacionarias en la copa, en forma muy parecida a las ondas

soporte fijo y produce ondas estacionarias. Observa cuán-

producidas sobre las cuerdas de un violín por la fricción de

tos nodos puedes producir.

un arco de violín. Inténtalo con un tazón metálico.

30. Mójate el dedo y frótalo en forma lenta alrededor del borde

31. Escribe una carta a la abuela y cuéntale cómo pueden can-

de una copa de vino con pie largo y borde delgado, al tiem-

celarse entre sí las ondas. Luego describe cuáles son algu-

po que sostienes firmemente la base de la copa sobre una

nas de las aplicaciones actuales de este fenómeno físico.

mesa con la otra mano. La fricción de tu dedo creará ondas

S U S T I T U Y E Y L I S T O** (F A M I L I A R I Z A C I Ó N C O N E C U A C I O N E S) **1

longitud de onda

***Frecuencia** =*

***; f** = 1 T*

1//

***Rapidez de onda** =*

o

periodo

periodo

32. ¿Cuál es la frecuencia, en hertz, que corresponde a cada

***frecuencia** 3 **longitud de onda**;*

uno de los siguientes periodos: (a) 0.10 s, (b) 5 s, (c) 1/60 s?

v** 5 **f

1

***Periodo** =*

*; **T** = **f***

***1**/*

34. ¿Cuál es la rapidez de una ola que tiene 2 Hz de frecuen-

frecuencia

cia y 1.5 m de longitud de onda?

33. ¿Cuál es el periodo, en segundos, que corresponde a cada

35. ¿Qué tan rápido viaja una onda sonora de 200 Hz que

una de las siguientes frecuencias: (a) 10 Hz, (b) 0.2 Hz,

tiene una longitud de onda de 1.7 m?

(c) 60 Hz?

***P I E N S A Y R E S U E L V E** (A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 36. El capitán de un barco observa que las crestas de una*

40. Como se muestra en el

onda pasan por la cadena de su ancla cada 5 s. Estima

dibujo, el ángulo medio

que la distancia entre las crestas de la onda es de 15 m.

del cono de la onda de

También estima de manera correcta la rapidez de las

choque generado por un

C

ondas. Demuestra que esta rapidez es de 3 m/s.

avión supersónico es de

37. Se observa que un peso suspendido de un resorte sube

45. ¿Cuál es la rapidez del

y baja una distancia de 20 cm dos veces cada segundo.

avión relativa a la rapidez

¿Cuál es su frecuencia? ¿Su periodo? ¿Su amplitud?

del sonido?

A

B

38. Un mosquito bate las alas a 600 vibraciones por segundo,

41. Una astronauta en la Luna

lo que produce el molesto zumbido de 600 Hz. Dado que

amarra una pequeña bola

la rapidez del sonido es 340 m/s, ¿cuánto viaja el sonido

de latón a una cuerda de

entre batimientos de alas? En otras palabras, encuentra la

1.00 m y fabrica un péndu-

longitud de onda del sonido del mosquito.

lo simple. Cronometra 15

39. En un teclado, tocas el do medio, cuya frecuencia es de

oscilaciones completas en

256 Hz.

un tiempo de 75 segundos.

a. ¿Cuál es el periodo de una vibración de este tono?

A partir de esta medición, calcula la aceleración debida a

la gravedad en la Luna. ¿Cuál es el resultado?

b. Conforme el sonido sale del instrumento con una rapi-

dez de 340 m/s, ¿cuál es su longitud de onda en el aire?

C C

A H

PÍ A

T P

U T E

LO R 1

19 9

R R

E E

V V

I SI E W

Ó N

371

***P I E N S A Y C L A S I F I C A** (A N Á L I S I S)*

42. Todas las ondas que se muestran tienen la misma rapidez

la altura del pico que resulta cuando los centros de los

en el mismo medio. Con una regla clasifica estas ondas,

pulsos coinciden.

de mayor a menor, para (a) amplitud, (b) longitud de

onda, (c) frecuencia y (d) periodo.

A

B

A

C

D

B

44. Clasifica los tonos que se escuchan de la sirena de un carro

C

de bomberos, de más alto a más bajo, cuando el carro de

bomberos viaja

a. hacia el escucha a 30 km/h.

b. hacia el escucha a 50 km/h.

c. alejándose del escucha a 20 km/h.

D

45. Un avión supersónico produce las ondas de choque A,

43. A continuación se muestran cuatro diferentes pares

B, C. Clasifica sus rapideces de mayor a menor.

de pulsos de ondas transversales que se mueven una

hacia otra. En algún punto en el tiempo, los pulsos se

encuentran e interactúan (interfieren) entre sí. Clasifica

los cuatro casos, de mayor a menor, sobre la base de

A

B

C

***PIENSA Y EXPLICA** (SÍNTESIS)*

46. ¿El periodo de un péndulo depende de la masa de la len-

fuerza impulsora proviene de una rueda giratoria que es

teja? ¿De la longitud de la cuerda?

impulsada por un motor eléctrico. ¿Cuál crees que sea la

47. Si un péndulo se acorta, ¿su frecuencia aumenta o dismi-

diferencia entre el periodo de la aguja que sube y baja y el

nuye? ¿Y su periodo?

periodo de la rueda giratoria? Defiende tu respuesta.

48. Un reloj de pie marca la hora de modo perfecto. Luego se

56. Con un tornillo de banco sujetas firmemente un extremo

reubica en una casa de verano en la cima de las montañas.

de una hoja de segueta. Pulsas el extremo libre y vibra. Si

¿Corre más rápido, más lento o igual? Explica.

haces lo mismo, pero primero colocas un trozo de arcilla

49. Levanta un maletín vacío y balancéalo de ida y vuelta a su

sobre el extremo libre, ¿cómo diferirá la frecuencia de

frecuencia natural. Si el maletín estuviera lleno de libros,

vibración, si es que difiere? ¿Haría una diferencia si el

¿la frecuencia natural sería menor, mayor o la misma que

trozo de arcilla estuviese pegado a la mitad? Explica. (¿Por

antes?

qué esta pregunta podría plantearse en el Capítulo 8?)

50. ¿El tiempo necesario para balancearse de ida y vuelta (el

57. Si sacudes el extremo de un resorte para producir una

periodo) en un columpio del parque es más largo o más corto

onda, ¿cuál es la diferencia entre la frecuencia de la onda

cuando estás parado que cuando estás sentado? Explica.

y la frecuencia de tu mano que sacude? ¿Tu respuesta

51. ¿Qué ocurre con el periodo de una onda cuando la fre-

depende de si produces una onda transversal o una onda

cuencia disminuye?

longitudinal? Defiende tu respuesta.

52. ¿Qué ocurre con la longitud de onda de una onda cuando

58. ¿Qué tipo de movimiento debes impartir a la boquilla de

disminuye la frecuencia?

una manguera de jardín de modo que el chorro de agua

resultante se aproxime a una curva sinusoidal?

53. Si la rapidez de una onda se duplica mientras la frecuen-

cia permanece igual, ¿qué ocurre con la longitud de onda?

59. ¿Qué tipo de movimiento debes impartir a un resorte

estirado (o Slinky) para producir

54. Si la rapidez de una onda se duplica mientras la longitud

de onda permanece igual, ¿qué ocurre con la frecuencia?

a. una onda transversal?

55. La aguja de una máquina de coser se mueve hacia arriba

b. una onda longitudinal?

y hacia abajo en un movimiento armónico simple. Su

60. ¿Qué tipo de onda es cada una de las siguientes?

75. La locomotora de un ferrocarril está en reposo con su

a. El sonido de una ballena que llama a otra ballena bajo

silbato chillante, luego comienza a moverse hacia ti.

el agua.

a. ¿La frecuencia del sonido que escuchas aumenta,

b. Un pulso enviado por una cuerda estirada cuando

disminuye o permanece igual?

golpea un extremo de la cuerda.

b. ¿Y qué hay de la longitud de onda que llega a tu oído?

c. Las vibraciones en una cuerda de guitarra.

c. ¿Y qué hay de la rapidez del sonido en el aire entre tú y

61. La luz roja tiene una longitud de onda más larga que la

la locomotora?

luz violeta. ¿Cuál tiene la mayor frecuencia?

76. ¿Por qué hay un efecto Doppler cuando la fuente de

62. Si duplicas la frecuencia de un objeto en vibración o la

sonido es estacionaria y el escucha está en movimiento?

onda que produce, ¿qué ocurre con el periodo?

¿En qué dirección debe moverse el escucha para oír una

63. ¿Cuál es la frecuencia del segundero de un reloj? ¿Del

frecuencia más alta? ¿Una frecuencia más baja?

minutero? ¿De la manecilla de las horas?

77. Cuando tocas el claxon mientras conduces hacia un

64. Si sumerges el dedo repetidas veces en un charco, creas

escucha estacionario, el escucha oye un aumento de la

ondas. ¿Qué ocurre con la longitud de onda si sumerges

frecuencia del claxon. ¿El escucha escucharía un aumento

el dedo con más frecuencia?

de la frecuencia del claxon si también estuviera en un

65. ¿Cómo se compara la frecuencia de vibración de un obje-

automóvil que viaja con la misma rapidez y en la misma

to pequeño que flota en el agua, con el número de ondas

dirección que tú? Explica.

que pasan por él a cada segundo?

78. ¿Existe un efecto Doppler apreciable cuando el movi-

66. En términos de longitud de onda, muestra qué tan lejos

miento de la fuente es en ángulo recto a un escucha?

viaja una onda en un periodo.

Explica.

67. ¿Cuál es la fuente de las ondas mecánicas? ¿De las ondas

79. ¿Cómo es que el efecto Doppler ayuda a la policía a

electromagnéticas?

detectar conductores que exceden límites de rapidez?

68. ¿Cuántos nodos, sin incluir los puntos extremos, hay en

80. ¿Sería correcto decir que el efecto Doppler es el cambio

una onda estacionaria que tiene dos longitudes de onda

aparente en la rapidez de una onda debido al movimien -

de largo? ¿Tres longitudes de onda de largo?

to de la fuente? (¿Por qué esta pregunta es tanto una

prueba de lectura de comprensión como una prueba de

69. Una roca se suelta en el agua y las ondas se dispersan

conocimiento físico?)

por la superficie plana del agua. ¿En qué se convierte la

energía de estas ondas cuando se extinguen?

81. ¿Por qué el fenómeno de la interferencia es importante en

la producción de ondas de proa o de ondas de choque?

70. Los patrones de onda de las Figuras 19.4 y 19.8 están com-

puestos de círculos. ¿Qué te dice esto acerca de la rapidez

82. ¿Qué puedes decir de la rapidez de un bote que forma

de las ondas que se mueven en diferentes direcciones?

una onda de proa?

71. ¿Por qué los relámpagos se ven antes de escuchar el trueno?

83. ¿Un estampido sónico ocurre en el momento en que un

avión excede la rapidez del sonido? Explica.

72. Un intérprete de banjo pulsa el punto medio de una

cuerda sujeta en ambos extremos. ¿Dónde están los

84. ¿Por qué un avión subsónico, sin importar cuán ruidoso

nodos de la onda estacionaria en la cuerda? ¿Cuál es

pueda ser, no puede producir un estampido sónico?

la longitud de onda de la cuerda en vibración?

85. Imagina un pez superrápido que puede nadar más rápido

73. En ocasiones, los violinistas tocan con arco una cuerda

que la rapidez del sonido en el agua. ¿Produciría un

para producir una vibración máxima (antinodos) a un

“estampido sónico”?

cuarto y tres cuartos de la longitud de la cuerda en lugar

86. Elabora una pregunta de opción múltiple que demuestre

de a la mitad de la cuerda. Entonces la cuerda vibra con

que un compañero de clase comprendió la diferencia

una longitud de onda igual a la longitud de la cuerda en

entre una onda transversal y una onda longitudinal.

lugar de al doble de la longitud de la cuerda. (Observa la

87. Elabora una pregunta de opción múltiple que demuestre

Figura 19.13a y b.) ¿Cuál es el efecto sobre la frecuencia

que un compañero de clase entendió cualquiera de los

cuando esto ocurre?

términos que describen una onda.

74. Un murciélago chirría al tiempo que vuela hacia una

pared. ¿La frecuencia del eco del chirrido que recibe es

mayor, menor o la misma que la emitida?

C C

A H

PÍ A

T P

U T E

LO R 1

19 9

R R

E E

V V

I SI E W

Ó N

373

37

P I E N S A Y D I S C U T E *(E V A L U A C I Ó N)*

88. Una persona pesada y una persona ligera se balancean

92. Los astrónomos descubren que la luz emitida por un

de ida y vuelta sobre columpios de la misma longitud.

elemento particular en un extremo del Sol tiene una fre-

Discute quién tiene el periodo más largo.

cuencia un poco mayor que la luz proveniente de dicho

89. ¿Tiene sentido que la masa de una lenteja de un péndulo

elemento en el extremo opuesto. ¿Qué te dicen estas

simple no afecte la frecuencia del péndulo? En tu dis-

mediciones acerca del movimiento del Sol?

cusión cita si la masa afecta o no la aceleración de

93. Si el sonido de un avión no proviene de la parte del cielo

caída libre.

donde se ve el avión, discute si esto implica o no que el

90. Si una tapa de gas se enciende durante algunos segundos,

avión viaja más rápido que la rapidez del sonido.

alguien a un par de metros de distancia escuchará el gas

94. ¿El ángulo cónico de una onda de choque se ensancha,

que escapa mucho antes de olerlo. ¿Qué indica esto acerca

estrecha o permanece constante a medida que un avión

de la rapidez del sonido y de la rapidez a la que se difunden

aumenta su rapidez? Haz un dibujo que sustente tu

las moléculas por el medio que transporta el sonido?

argumento.

91. Analiza cómo algunos aprendices confunden los dos

términos de rapidez de onda y frecuencia de onda cuando suponen que los términos se refieren a la misma cosa.

C A P Í T U L O 2 0

Sonido ***2***

20.1 La naturaleza del sonido

20.2 El sonido en el aire

20.3 Reflexión del sonido

20.4 Refracción del sonido

3

20.5 Vibraciones forzadas

20.6 Resonancia

20.7 Interferencia

20.8 Batimientos

4

1 *Ken Ford fue uno de los primeros en usar audífonos antirrui-*

do para pilotear planeadores en silenciosa tranquilidad. ***2*** *Los profesores de física Chris Chiaverina y Tom Rossing producen*

sonidos en un hang, un novedoso instrumento de acero que se

toca con las manos. ***3*** *Cathrine W. Tellefsen, en la University of Oslo, muestra flamas que oscilan con el sonido cuando se*

coloca una bocina cerca del extremo de un tubo lleno de gas.

Ellen K. Henriksen cuenta los nodos, donde las flamas son más

altas. ***4*** *Emily Ackerman llega a una intrigante conclusión: ¡el sonido es lo único que puede oírse!*

C A PÍ T U LO 20 SO N I DO

375

Como se observa en la prime-

ra fotografía al inicio del capítulo,

Una de las personas que mejor logró combinar en

el mundo la tarea de físico, escritor y educador de

física es Kenneth W. Ford, quien fue profesor en Ken usaba audífonos a prueba de la University of California, presidente de colegio y director

ruido cuando volaba aviones rui-

ejecutivo y presidente de consejo del American Institute of

dosos hace algunos años. Su entre-

Physics antes de convertirse en profesor de los grados 9 a 12

tenido libro In Love with Flying

en la Germantown Academy de Pennsylvania. Un experto

destaca su pasión aun mayor por

y un escritor de física cuántica, Ken es un apasionado de la

los vuelos sin motor: el vuelo pla-

enseñanza, de volar pequeños aviones, de los planeadores y de

neado. En el retrato de Ken, obser-

su esposa Joanne. También es un amigo cercano y pule gran

va la constante de Planck en la

parte de mis escritos antes de que se publiquen. Física concep-

placa de su automóvil híbrido y un

tual se ha beneficiado del profundo y amplio conocimiento

prendedor de planeador diamante

en física de Ken, por lo cual estoy agradecido.

en su solapa. Los últimos libros de Ken, escritos con total

Cuando escribí por primera vez Física conceptual, el libro

claridad, In Love With Flying, The Quantum World: Quan-

de texto de Ken Basic Physics, fue una inspiración para mí,

tum Physics for Everyone y 101 Quantum Questions: What You como lo fueron los tres volúmenes de Feynman's Lectures Need to Know About the World You Can't See, son esenciales on Physics y el libro de texto de Eric Rogers, Physics for the para quien quiera aprender física cuántica. Además de ofrecer

Inquiring Mind. Ken fue uno de los primeros revisores de

asesorías en línea a estudiantes de bachil erato, Ken escribe

Física conceptual. Lo elogió y adoptó para sus propias clases, en la actualidad sobre su historia personal en el desarrol o de

me alertó de algunos errores y sugirió mejoras. Un refrán

la primera bomba H en Los Álamos con su finado mentor,

entre profesores dice que si quieres aprender una materia, en-

John Wheeler.

séñala. Yo agrego: si quieres sumar más a tu conocimiento

Mi dedicatoria a la octava edición de Física conceptual fue:

de física, escribe acerca de el a. Yo aprendo continuamente,

A Kenneth W. Ford, eminente físico, gran ser humano. Esta

mucho, gracias a las aportaciones de Ken.

dedicatoria sigue siendo vigente.

***20.1** La naturaleza del sonido*

Si un árbol cayera en medio de un espeso bosque a cientos de kilómetros de distancia de cualquier ser vivo, ¿habría sonido? Diferentes personas responderán esta pregunta en diferentes formas. "No", dirán algunos, "el sonido es subjetivo y se necesita un escucha. Si no hay escucha, no habrá sonido". "Sí", dirán otros, "un sonido no es algo en la cabeza de un escucha. Un sonido es una cosa objetiva". Con discusiones como ésta no suele llegarse a ningún acuerdo porque los participantes no se dan cuenta de que argumentan no acerca de la naturaleza del sonido, sino acerca de la definición de la palabra.

Cualquier postura está en lo correcto, dependiendo de la definición que se utilice, pero la investigación sólo puede proceder cuando se acuerda una definición. Los científicos, como los cinco que se muestran en las fotografías al comienzo del capítulo, adoptan la posición objetiva y definen el sonido como una forma de energía que existe ya sea que se escuche o no. Ellos parten de ahí para investigar su naturaleza.

Origen del sonido

Casi todos los sonidos son ondas producidas por las vibraciones de la materia. En un piano, un violín y una guitarra, el sonido se produce por las cuerdas en vibración; en un saxofón, por una caña (lengüeta) que vibra; en una flauta, por una columna de aire que ondula en la boquilla. Tu voz resulta de la vibración de tus cuerdas vocales. Los sonidos en el aire son causados por una amplia variedad de vibraciones.

En cada uno de estos casos, la vibración original estimula la vibración de algo más grande o más masivo, como la caja de resonancia de un instrumento de cuerda, la columna de aire en el interior de un instrumento de caña o viento, o el aire en la garganta y la boca de un cantante. Este

material en vibración envía después una perturbación a través del medio circundante, por lo general aire, en forma de ondas longitudinales. Bajo condiciones ordinarias, las frecuencias de la fuente de vibración y las ondas

sonoras son iguales. La impresión subjetiva acerca de la frecuencia del sonido se describe con la palabra ***tono****, también conocido como* ***altura****. La frecuencia corresponde a la altura: un sonido agudo de un flautín tiene una frecuencia de vibración alta, y un sonido grave de una sirena de niebla tiene una frecuencia de vibración baja.*

En general, el oído de una persona joven puede escuchar tonos que corresponden al intervalo de frecuencias de más o menos entre 20 y 20,000 hertz. Con la edad, este rango de audición humana se reduce, especialmente en el extremo de alta frecuencia.

Los elefantes se comunican entre

Las ondas sonoras con frecuencias por debajo de 20 hertz son ***infrasónicas****, y las que ellos con ondas infrasónicas. Sus*

tienen frecuencias por arriba de 20,000 hertz se llaman ***ultrasónicas****. El ser humano grandes orejas les ayudan a detectar dichas ondas sonoras de baja*

no puede escuchar ondas sonoras infrasónicas ni ultrasónicas. Infrasónica: una fre-frecuencia.

cuencia demasiado baja para la audición humana. Ultrasónica: una frecuencia demasiado alta para la audición humana.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Cuál es la frecuencia de onda del sonido producido por un diapasón

de 220 hertz?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

220 Hz.

Medios que transmiten el sonido

La mayoría de los sonidos que escuchas se transmiten a través del aire. Sin embargo, cualquier sustancia elástica —ya sea sólida, líquida, gas o plasma— puede transmitir el sonido. La elasticidad es la propiedad de un material que cambia de forma en reacción a una fuerza aplicada y luego retoma su forma inicial una vez que se retira la fuerza de distorsión. El acero es una sustancia elástica. Por el contrario, la masilla es inelástica.1

En los líquidos y sólidos elásticos, los átomos están relativamente juntos, responden con rapidez a los movimientos mutuos y transmiten energía con poca pérdida. El sonido viaja cerca de 4 veces más rápido en el agua que en el aire y alrededor de 15 veces más rápido en el acero que en el aire.

En relación con los sólidos y los líquidos, el aire es un mal conductor del sonido. Puedes escuchar el sonido de un tren distante con más claridad si pones el oído contra la vía.

De igual modo, el tictac de un reloj colocado sobre una mesa más lejana de la distancia de audición puede escucharse si pones el oído sobre la mesa. O haz sonar piedras bajo el agua mientras tu oído está sumergido. Escucharás el sonido de los golpes con mucha Los átomos y las moléculas en un

claridad. Si alguna vez nadaste en presencia de botes motorizados, es probable que hayas medio tiemblan cuando transmiten

sonido. El sonido no puede viajar

observado que puedes escuchar los motores de los botes con mucha más claridad bajo en el vacío porque no hay nada

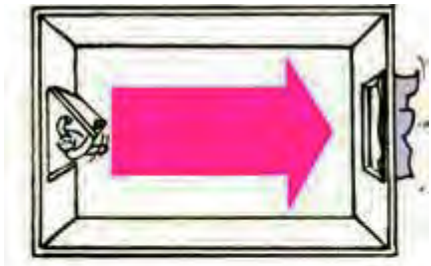
el agua que sobre ella. Los líquidos y los sólidos cristalinos por lo general son excelentes que lo haga temblar.

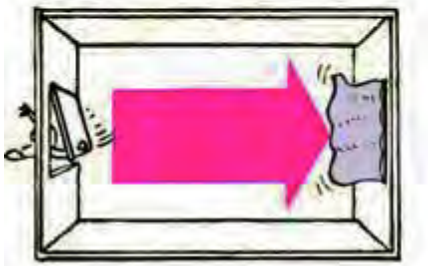
conductores del sonido —mucho mejores que el aire—. La rapidez del sonido suele ser mayor en los sólidos que en los líquidos, y mayor en los líquidos que en los gases. El sonido no viajará en el vacío porque no hay nada que comprimir o expandir.

20.2 *El sonido en el aire*

Cuando aplaudes, el sonido producido no es periódico. Consiste en un pulso de ondas que viajan hacia afuera en todas direcciones. Para entender mejor cómo se mueve un pulso en el aire, considera una habitación larga, como la que se muestra en la Figura 20.1a. En un extremo hay una ventana abierta con una cortina sobre ella. En el otro extremo hay una puerta. Cuando abres la puerta, puedes imaginar que la puerta

1Elasticidad no es "capacidad de estiramiento", como en una banda de caucho. Algunos materiales muy rígidos son elásticos, como el acero.





empuja las moléculas junto a ella y las aleja de sus posiciones iniciales y hacia sus vecinas. Las moléculas vecinas, a su vez, empujan sobre sus vecinas, y así sucesivamente, como una compresión que viaja a lo largo de un resorte, hasta que la cortina ondula Compresión

fuera de la ventana. Un pulso de aire comprimido se movió de la puerta a la cortina.

Este pulso de aire comprimido se llama ***compresión****.*

Cuando cierras la puerta, como en la Figura 20.1b, la puerta saca de la habitación (a)

algunas moléculas de aire. Esto produce un área de presión baja detrás de la puerta.

Entonces las moléculas vecinas se mueven hacia esa área, lo que deja una zona de menor presión detrás de ellas. Se dice que esta zona de aire a menor presión está rarificada. Otras moléculas más alejadas de la puerta, a su vez, se mueven hacia estas regiones Rarefacción

rarificadas, y de nuevo una perturbación viaja por toda la habitación. Esto lo demuestra la cortina, que ondula hacia adentro. Esta vez la

*perturbación es una **rarefacción**.*

Como en todo el movimiento ondulatorio, no es el medio en sí el que viaja por la (b)

habitación, sino el pulso que transporta energía. Tanto en la compresión como en la rarefacción, el pulso viaja de la puerta a la cortina. Esto se sabe porque, en ambos casos, ***F I G U R A 2 0 .1***

(a) Cuando la puerta se abre, una com-

la cortina se mueve después de que la puerta se abre o se cierra. Si abres y cierras la presión viaja por toda la habitación.

puerta de manera continua y periódica, puedes establecer una onda de compresiones (b) Cuando la puerta se cierra, una rare-y rarefacciones periódicas que harán que la cortina se balancee hacia adentro y hacia facción viaja por toda la habitación.

afuera de la ventana. En una escala mucho menor pero más rápida, esto es lo que ocurre cuando golpeas un diapasón. Las vibraciones periódicas del diapasón y las ondas producidas son mucho mayores en frecuencia y menores en amplitud que las causadas por la puerta que se balancea. No observas el efecto de las ondas sonoras sobre la cortina, pero estás muy al tanto de ellas cuando llegan a tus tímpanos sensibles.

Considera las ondas sonoras del tubo que se muestra en la Figura 20.2. Por simplicidad, sólo se muestran las ondas que viajan en el tubo. Cuando el brazo del diapasón Compresiones

Rarefacciones

F I G U R A 2 0 . 2

Las compresiones y las rarefacciones viajan (ambas con la misma rapidez y en la misma dirección) desde el diapasón a través del aire en el tubo.

F I G U R A 2 0 . 3

junto al tubo se mueve hacia el tubo, una compresión entra en el tubo. Cuando el brazo Una raqueta de ping-pong que vibra en medio de bolas de ping-pong produce

se aleja en la dirección opuesta, una rarefacción le sigue a la compresión. Es como una una vibración de las bolas.

raqueta de ping-pong que se mueve de ida y vuelta en una habitación llena

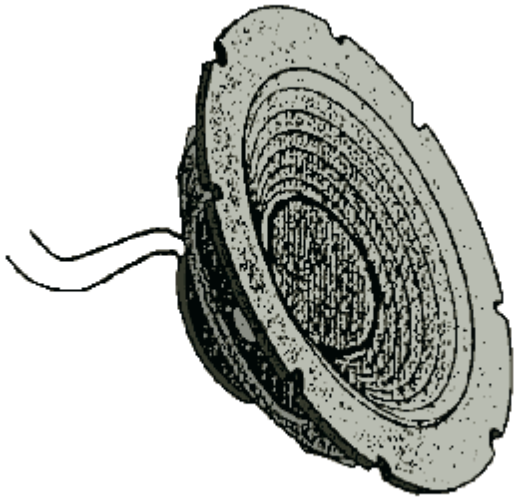
con pelotas de ping-pong. A medida que la fuente vibra, se produce una serie de compresiones y rarefacciones. La frecuencia de la fuente que vibra y la frecuencia de la onda que produce son iguales.

Haz una pausa para reflexionar acerca de la física del sonido mientras escuchas tu radio en algún momento. La bocina del radio es un cono de papel que vibra al ritmo de una señal eléctrica. Las moléculas de aire junto al cono que vibra de la bocina se ponen en vibración. Este aire, a su vez, vibra contra las partículas vecinas que, por su parte, ha-

FIGURA 20.4

Ondas de aire comprimido y rarificado, producidas por el cono en vibración de la bocina, constituyen el agradable sonido de la música.

cen lo mismo, y así sucesivamente. Como resultado, de la bocina emanan patrones rítmicos de aire comprimido y rarificado, lo que inunda toda de la bocina,



BOCINA

La bocina de tu radio u otro sistema de reproducción de sonido

convierte señales eléctricas en ondas sonoras. Las señales eléctricas pasan a través de una bobina devanada alrededor del cuello de un

cono de papel. Esta bobina, que actúa como un electroimán, se ubica cerca de un imán permanente. Cuando fluye corriente en una dirección, la fuerza magnética empuja el electroimán hacia el imán permanente, lo que jala al cono hacia adentro. Cuando la corriente fluye en la dirección opuesta, el cono se empuja hacia afuera. Las vibraciones en la señal eléctrica hacen que el cono vibre. Las vibraciones del cono producen, entonces, ondas sonoras en el aire.

La física de las grandes bocinas se aplica a las pequeñas, incluso a las que caben en tu oído.

la habitación con movimientos ondulatorios. El mismo proceso ocurre con los audífonos de botón que utilizas con tu iPod u otro dispositivo en el que la bocina es tan pequeña que cabe en tu oído. El aire en vibración

resultante pone a vibrar tu tímpano, que, a su vez, envía cascadas de impulsos eléctricos rítmicos a lo largo de la cóclea y hacia el cerebro. Y escuchas el sonido de la música.

F I G U R A 2 0 . 5

Micrófono

(a) Las vibraciones de la bocina del radio

envían compresiones de aire (líneas

rojas) y producen vibraciones similares

Longitud

en el micrófono, que se despliegan en

un osciloscopio. (b) La forma de la onda

de onda

sobre la pantalla del osciloscopio revela

información acerca del sonido.

Amplitud

Bocina en

Osciloscopio

Periodo

vibración

(a)

(b)

Rapidez del sonido en el aire

Si observas a una persona cortar madera a cierta distancia, o a lo lejos ves a un jugador Tus dos oídos son tan sensibles a

de béisbol golpear una pelota, puedes ver con facilidad que el golpe tiene lugar mucho las diferencias de sonido que llega

antes de que el sonido llegue a tus oídos. De la misma manera que el trueno se escu -

a ellos, que puedes decir desde

cha después de que ves el destello de un relámpago. Estas experiencias comunes mues-qué dirección proviene el sonido

tran que el sonido necesita un tiempo considerable para viajar de un lugar a otro.

con una precisión casi exacta. Con

La rapidez del sonido depende de las condiciones del viento, la temperatura y la hu-un solo oído, no tendrías ni idea

(y, en una emergencia, podrías no

medad. No depende de la intensidad o la frecuencia del sonido; todos los sonidos en el saber en qué dirección saltar).

mismo medio viajan con la misma rapidez. La rapidez del sonido en aire seco a 08C es de alrededor de 330 metros por segundo, casi 1,200 kilómetros por hora (un poco más que una millonésima parte de la rapidez de la luz). El vapor de agua en el aire aumenta un poco esta rapidez. El sonido viaja más rápido por el aire caliente que por el aire frío.

Esto es de esperar porque las moléculas que se mueven más rápido en el aire caliente rebotan entre sí con más frecuencia y, por tanto, pueden transmitir un pulso en menos tiempo.2 Por cada grado que aumente la temperatura sobre 0C, la rapidez del sonido en el aire aumenta en 0.6 m/s. De este modo, en aire a temperatura ambiente normal, de aproximadamente 20C, el sonido viaja a cerca de 340 m/s.

2La rapidez del sonido en un gas es aproximadamente ¾ partes de la rapidez promedio de las moléculas del gas.

C A PÍ T U LO 20 SO N I DO

379

PRACTICANDO LA FÍSICA

Suspende la rejilla de alambre de un refrigerador o un

horno de una cuerda y sostén los extremos de la cuerda

a tus oídos. Pide a un amigo que golpee en forma suave

la rejilla con pajas de escoba y con otros objetos. El efecto se

aprecia mejor cuando estás relajado y con los ojos cerrados.

¡Asegúrate de intentarlo!

Una onda de radio es electromagnética

y viaja con la rapidez de la luz.

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Las compresiones y las rarefacciones en una onda sonora viajan en la misma dirección o en direcciones opuestas unas de otras?

2. ¿Cuál es la distancia aproximada de una tormenta cuando observas una *Un receptor de radio la convierte*

en una onda mecánica, sonido, que

demora de 3 s entre el destello de un relámpago y el sonido del

trueno?

viaja un millón de veces más lento.

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Viajan en la misma dirección (como se muestra en la Figura 20.1).*

2. *Si supones que la rapidez del sonido en el aire es de aproximadamente 340 m/s, en 3 s viajará 340 m/s 3 3 s 5 1,020 m. No hay demora considerable para el destello, así que la tormenta está a un poco más de 1 km de distancia.*

¡De modo que una onda de radio

no es una onda sonora!

Energía en ondas sonoras

El movimiento ondulatorio de todo tipo posee energía de grados variables. Las ondas electromagnéticas del Sol, por ejemplo, proporcionan las enormes cantidades de energía que sostienen la vida sobre la Tierra. En comparación, el sonido tiene una cantidad de energía en extremo pequeña. Esto se debe a que para producir sonido se necesita sólo una pequeña cantidad de energía. Por ejemplo, si 10 millones de personas habla-ran al mismo tiempo, producirían una energía sonora igual a sólo la energía necesaria para operar una linterna común. La audición sólo es posible debido a que tus oídos son muy sensibles. Sólo el micrófono más sensible puede detectar el sonido que es más suave de lo que puedes escuchar.

La energía sonora se disipa en energía térmica mientras el sonido viaja en el aire.

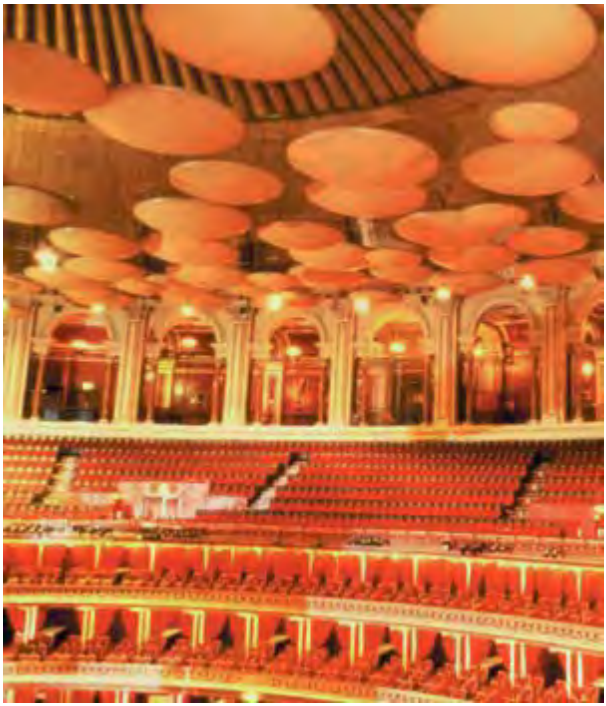
En el caso de ondas de mayor frecuencia, la energía sonora se transforma en energía interna con más rapidez que para ondas de frecuencias más bajas. Como resultado, los sonidos de frecuencias bajas viajan más lejos por el aire que los sonidos de frecuencias más altas. Es por eso que las sirenas de niebla de los barcos son de frecuencia baja.

20.3 *Reflexión del sonido*

A la reflexión del sonido se le llama eco. La fracción de energía transportada por la onda sonora reflejada puede ser grande si la superficie es rígida y lisa, y menor si la superficie es blanda e irregular. La energía sonora no transportada por la onda sonora reflejada la transporta la onda "transmitida" (absorbida).

El sonido se refleja de una superficie lisa de la misma forma que lo hace la luz: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión (Figura 20.6). En ocasiones, ***F I G U R A 2 0 . 6***

cuando el sonido se refleja de las paredes, el techo y el suelo de una habitación, las El ángulo del sonido incidente es superficies reflejantes son muy reflectantes y el sonido se vuelve confuso. Cuando el igual al ángulo del sonido reflejado.



sonido experimenta múltiples reflexiones y persiste después de que la fuente deja de emitir, escuchas ***reverberaciones****.*

Por otra parte, si las superficies reflejantes son demasiado absorbentes, el nivel sonoro será bajo y la habitación sonará mitigada y sin vida. La reflexión del sonido en una habitación hace que suene vivo y pleno, como seguramente descubriste mientras cantabas en la ducha. En el diseño de un auditorio o una sala de conciertos, debe lograrse un equilibrio entre reverberación y absorción. El estudio de las propiedades del sonido se llama acústica.

Con frecuencia es conveniente colocar superficies muy reflejantes detrás del escenario para dirigir el sonido hacia el auditorio. En algunas salas de conciertos, las superficies reflejantes están suspendidas arriba del escenario. Con mucha frecuencia son grandes superficies plásticas brillantes que también reflejan luz (Figura 20.8). Un escucha puede observar estos reflectores y ver las imágenes reflejadas de los integrantes de la orquesta. Los reflectores plásticos son un poco curvos, lo que aumenta el campo de visión. Tanto el sonido como la luz obedecen la misma ley de reflexión, por lo que si un Los murciélagos cazan polillas en

reflector se orienta de modo que puedas ver un instrumento musical en particular, ten la oscuridad mediante ecolocaliza-por seguro que también lo escucharás. El sonido proveniente del instrumento seguirá la ción. Algunas polillas están prote-línea de visión hacia el reflector y luego hacia ti.

gidas por una gruesa cubierta de

escamas velludas que amortiguan

los ecos.

FIGURA 20.7

FIGURA 20.8

Paredes esponjosas especiales absorben

Las placas plásticas arriba de la orquesta reflejan

más que reflejan el sonido en esta habi-

tanto la luz como el sonido. Ajustarlas es bastan-

tación acústica.

te simple: lo que ves es lo que escuchas.

***20.4** Refracción del sonido*

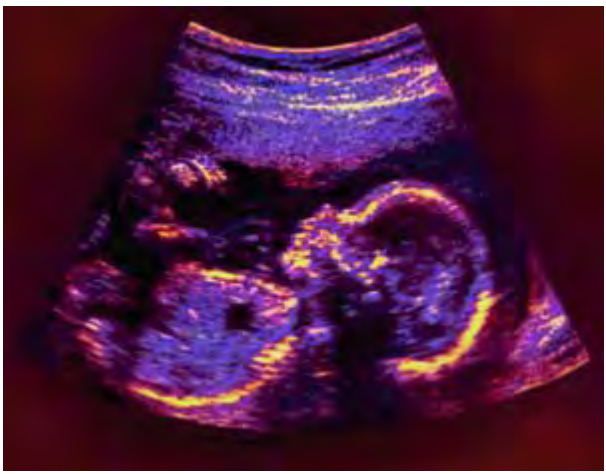
*Cuando las ondas sonoras continúan a través de un medio y se doblan, experimentan **refracción**. Las ondas sonoras se doblan cuando partes de los frentes de onda viajan con diferentes rapideces. Esto puede ocurrir en vientos disparejos o cuando el sonido viaja por el aire con temperaturas desiguales. En un día cálido, el aire cerca del suelo puede* ***SCREENCAST: Reflexión y***

ser mucho más caliente que el resto del aire, de modo que la rapidez del

sonido cerca ***refracción del sonido***

del suelo aumenta (Figura 20.9). En consecuencia, las ondas sonoras tienden a doblarse y alejarse del suelo, lo que resulta en un sonido que parece no viajar bien. La refracción del sonido es provocada por diferencias en la rapidez del sonido.

Escuchas el trueno cuando el relámpago está razonablemente cerca, pero con frecuencia no escuchas el trueno de los relámpagos distantes debido a la refracción. El sonido viaja más lento a altitudes más altas y se dobla alejándose del suelo, de modo que no puedes escucharlo. Lo opuesto ocurre con frecuencia en un día frío o en una noche cuando la capa de aire cerca del suelo es más fría que el aire superior. Entonces se reduce la rapidez del sonido cerca del suelo. La mayor rapidez de los frentes de onda que están encima hace que el sonido se doble hacia el suelo, lo que resulta en un sonido



C A PÍ T U LO 20 SO N I DO

381

F I G U R A 2 0 . 9

Aire frío

Las ondas sonoras se doblan en el aire a

(a)

temperaturas distintas.

Aire caliente

Aire caliente

(b)

VIDEO: Refracción del sonido

Aire frío

que puede escucharse sobre distancias mucho más largas. La refracción del sonido explica por qué puedes escuchar con claridad conversaciones sobre una fogata lejana al otro lado de un lago en la noche. El sonido no siempre viaja en trayectorias rectas.

Observa en la Figura 20.9 que las

La refracción del sonido ocurre bajo el agua, donde la rapidez del sonido varía con la direcciones de las ondas sonoras

temperatura. Esto plantea un problema para las embarcaciones de superficie que hacen (rojo) están en ángulos rectos res-rebotar ondas de alta frecuencia en el fondo del océano para trazar las características pecto de los frentes de onda (azul).

del fondo marino. La refracción es una bendición para los submarinos que quieren escapar a la detección. Debido a los gradientes térmicos y las capas de agua a diferentes temperaturas, la refracción del sonido deja brechas o "puntos ciegos" en el agua. Es ahí donde se esconden los submarinos. Si no fuera por la refracción, los submarinos se detectarían con más facilidad.

El sonido compuesto de frecuencias más altas que el rango de audición humano es ultrasonido. Los médicos utilizan las múltiples reflexiones y refracciones de las ondas ultrasónicas en una técnica inocua para ver dentro del cuerpo sin el uso de rayos X.

Cuando el ultrasonido entra en el cuerpo, se refleja con más fuerza desde el exterior de un órgano que desde su interior, y se obtiene una imagen del perfil del órgano. Cuando el ultrasonido incide sobre un objeto en movimiento, el sonido reflejado tiene una frecuencia un poco diferente. Con este efecto Doppler, un médico puede "ver" el latido del corazón de un feto con apenas 11 semanas de haber sido concebido (Figura 20.10).

El ultrasonido se utiliza en medicina para producir imágenes de órganos internos del cuerpo y bebés en el útero, y en la industria para detectar desperfectos en los metales. Aunque la técnica de eco ultrasónico puede ser relativamente nueva para el ser humano, es materia vieja para criaturas como los murciélagos y los delfines. Los mur- ***F I G U R A 2 0 .1 0***

ciélagos, por ejemplo, emiten chillidos ultrasónicos y localizan objetos mediante sus Un feto humano se muestra con clari-ecos. Los delfines hacen esto y más. Mientras que el sonido es un sentido pasivo para dad en una

pantalla de visualización el ser humano, es un sentido activo para el delfín que envía sonidos y luego percibe su mediante ultrasonido.

entorno sobre la base de sus ecos. Percibir ondas ultrasónicas permite a un delfín "ver"

a través de los cuerpos de otros animales y personas. La piel, el músculo y la grasa son casi transparentes para los delfines, de modo que ellos sólo "ven" un delgado perfil del cuerpo —pero los huesos, los dientes y las cavidades llenas de gas son claramente ***F I G U R A 2 0 . 1 1***

Un delfín emite sonido de ultraalta

frecuencia para localizar e identificar

objetos en su entorno. La distancia la

perciben por la demora temporal entre

el sonido enviado y la recepción de su

eco, y la dirección se percibe mediante

las diferencias en el tiempo que le toma

al eco llegar a sus dos oídos. La principal

dieta de un delfín es el pescado y, dado

que la audición de los peces está limita-

da a frecuencias bastante bajas, los peces

no son alertados de que serán cazados.

evidentes—. La evidencia física de cánceres, tumores, ataques cardiacos e incluso estados emocionales pueden "verlas" los delfines:3 el ser humano apenas pudo lograrlo con el ultrasonido en fecha reciente.

P U N T O D E C O N T R O L

Una embarcación sondea el fondo marino con sonido ultrasónico que viaja a un promedio de 1,530 m/s en agua de mar. ¿Qué tan profunda es el agua si la demora temporal del eco desde el suelo marino es de 2 s?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

1,530 m (1 s para bajar y 1 s para subir).

***20.5** Vibraciones forzadas*

*Si golpeas un diapasón no montado, el sonido proveniente de él puede ser más bien des-vanecido. Si sostienes el mismo diapasón en una mesa después de golpearlo, el sonido es más fuerte. Esto se debe a que la mesa es forzada a vibrar y, con su área superficial más grande, la mesa pone más aire en movimiento. La mesa puede ponerse a vibrar por un diapasón de cualquier frecuencia, un caso de **vibración forzada**. El mecanismo en una caja de música se monta sobre una caja de resonancia. Sin la caja de resonancia, el sonido producido por el mecanismo de la caja de música es apenas audible. Las cajas de resonancia son importantes en todos los instrumentos musicales de cuerda.*

Frecuencia natural

Cuando alguien suelta una llave de tuercas sobre un piso de concreto,

seguro que no confundes su sonido con el de un bate de béisbol que golpea el suelo. Esto se debe a que los dos objetos vibran de manera diferente cuando son golpeados. Golpea una llave de tuercas y las vibraciones que produce son diferentes a las vibraciones de un bate de béisbol, o de cualquier otra cosa. Cualquier objeto compuesto de un material elástico, cuando se perturba, vibrará a su propio conjunto especial de frecuencias, que en conjunto forman su sonido único. Se habla de la ***frecuencia natural****, de un objeto, que depende de factores como la elasticidad y la forma del objeto. Desde luego, campanas y diapaso-F I G U R A 2 0 . 1 2*

nes vibran a sus propias frecuencias características. Y es muy interesante que la mayoría La frecuencia natural de la campana más de las cosas, desde los planetas hasta los átomos, y casi todo lo demás entre ellos, tengan pequeña es mayor que la de la campana

más grande, y tañe en una altura mayor.

una elasticidad propia y vibren a una o más frecuencias naturales.

20.6 *Resonancia*

Cuando la frecuencia de las vibraciones forzadas sobre un objeto coincide con la frecuencia natural del objeto, ocurre un drástico aumento en la amplitud. Este fenómeno se llama ***resonancia****. Literalmente, resonancia significa "volver a sonar", o "sonar de nuevo". La masilla no resuena porque no es elástica, y un pañuelo que se suelta es demasiado flojo. Para que algo resuene, necesita una fuerza que lo regrese a su posición*
SCREENCAST: Resonancia del sonido

de partida y suficiente energía que lo mantenga vibrando.

3El sentido más importante del delfín es acústico, porque la visión no es un sentido muy útil en las profundidades marinas, con frecuencia turbias y oscuras. Lo que es más interesante: el delfín puede reproducir las señales sónicas que pintan la imagen mental de sus alrededores; por ende, es probable que para comunicar su experiencia a otros delfines, comunique toda la imagen acústica de lo que "ve", y la coloque directamente en las mentes de otros delfines. Un delfín no necesita palabras o símbolos para "pez", por ejemplo, sino que comunica una imagen de la cosa real, quizás con un énfasis destacado mediante un filtrado selectivo, de la misma manera como uno comunica un concierto musical a otros a través de varios medios de reproducción sonora. ¡Pequeña maravilla que el lenguaje del delfín sea muy distinto al del ser humano!

C A PÍ T U LO 20 SO N I DO

383

Una experiencia frecuente que ilustra la resonancia ocurre en un columpio. Cuando empujas un columpio, lo empujas en ritmo con la frecuencia natural del balanceo. Más importante que la fuerza con la que empujas es el tiempo. Incluso pequeños empujones de alguien más, si se suministran en ritmo con la frecuencia natural del movimiento del balanceo, producen grandes amplitudes. Una demostración común de la resonancia en el salón de clase consiste en ajustar un par de diapasones a la misma frecuencia y separarlos más o menos un metro. Cuando uno de los diapasones se golpea, éste pone a vibrar al otro diapasón (Figura 20.13). Ésta es una versión a pequeña escala de empujar a un amigo en un columpio: el tiempo es lo que importa. Cuando una serie de ondas sonoras choca con el diapasón, cada compresión da al brazo del diapasón un pequeño empujón.

Dado que la frecuencia de dichos empujones corresponde a la frecuencia natural del ***F I G U R A 2 0 .1 3***

diapasón, los empujones aumentan de manera sucesiva la amplitud de la vibración. Esto Cuando Ryan Patterson golpea uno de se debe a que los empujones suceden en el momento apropiado y ocurren repetidas veces los diapasones de frecuencia coincidente, el otro se pone en resonancia.

en la misma dirección que el movimiento instantáneo del diapasón. El movimiento del segundo diapasón con frecuencia se denomina vibración simpática.

Si los diapasones no se ajustan para frecuencias coincidentes, el momento de los empujones está fuera de lugar y no ocurrirá resonancia. Cuando sintonizas un radio, de igual modo ajustas la frecuencia natural de la electrónica para que coincida con una de las muchas señales circundantes. Entonces el conjunto resuena en una estación a la ***VIDEO: Resonancia***

vez en lugar de reproducir todas las estaciones al mismo tiempo.

F I G U R A 2 0 . 1 4

Etapas de la resonancia (las flechas azules indican ondas sonoras que viajan hacia la derecha). (a) La primera compresión encuentra al diapasón y le produce un pequeño y momentáneo empujón. (b) El diapasón se dobla y luego (c) regresa a su posición inicial justo en el momento cuando llega una rarefacción y (d) llega más allá en la dirección opues-

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

La resonancia ocurre siempre que se aplican impulsos sucesivos a un objeto en vi- ta. Justo cuando el diapasón regresa a bración, en ritmo con su frecuencia natural. Las tropas de caballería que marchaban su posición inicial (e), llega la siguiente por un puente cerca de Manchester, Inglaterra, en 1831, provocaron sin querer el co- compresión para repetir el ciclo. Ahora lapso del puente cuando marcharon en ritmo con la frecuencia natural del puente. el diapasón se dobla más porque está en Desde entonces, se acostumbra ordenar a las tropas "romper el paso" cuando cruzan movimiento.

puentes, para evitar la resonancia. Un siglo más tarde, otro gran desastre en puentes fue producido por una resonancia causada por el viento (Figura 20.15).

VIDEO: Resonancia y puentes

F I G U R A 2 0 . 1 5

En 1940, cuatro meses después de haber sido terminado, el puente Tacoma Narrows, en el estado de Washington, fue destruido por resonancia generada por el viento. Un ligero vendaval produjo una fuerza irregular en resonancia con la frecuencia natural del puente, lo que aumentó de manera constante la amplitud de vibración hasta que el puente colapsó.

Los efectos de la resonancia están en todo tu entorno. La resonancia acentúa no sólo ***F I G U R A 20 .16***

el sonido de la música, sino también el color de las hojas en el otoño, la altura de las Manuel descubre que produce una gran mareas oceánicas, el funcionamiento de los láseres y una gran multitud de fenómenos amplitud cuando empuja en ritmo con que se suman a la belleza del mundo.

la frecuencia natural del columpio.

20.7 *Interferencia*

Las ondas sonoras, al igual que cualquier onda, pueden presentar ***interferencia****. Recuerda que la interferencia de ondas se estudió en el Capítulo 19. En la Figura 20.17*

se muestra una comparación entre la interferencia en ondas transversales y en ondas longitudinales. En cualquier caso, cuando las crestas de una onda se traslapan con ***SCREENCAST: Interferencia***

las crestas de otra onda, resulta un aumento de amplitud. O, cuando la cresta de una ***de ondas***

onda se traslapa con el valle de otra onda, resulta una reducción de

amplitud. En el caso del sonido, la cresta de una onda corresponde a una compresión y el valle de una onda corresponde a una rarefacción. La interferencia sucede con todas las ondas, tanto transversales como longitudinales.

FIGURA 20.17

Interferencia de onda constructiva (a,b)

y destructiva (c,d) en ondas transversales

y longitudinales.

(a)

La superposición de dos ondas transversales idénticas en fase produce una onda de amplitud aumentada.

(b)

La superposición de dos ondas longitudinales idénticas en fase produce una onda de intensidad aumentada.

(c)

Dos ondas transversales idénticas que están fuera de fase se destruyen entre sí cuando se superponen.

(d)

Dos ondas longitudinales idénticas que están fuera de fase se destruyen entre sí cuando se superponen.

Un caso interesante de interferencia de sonido se ilustra en la Figura 20.18. Si estás a igual distancia de dos bocinas que emiten tonos idénticos de frecuencia fija, el sonido es más intenso porque se suman los efectos de las dos bocinas. Las compresiones y las rarefacciones de los tonos llegan de forma sincronizada, o en fase. Sin embargo, si tú o una bocina se mueven a un lado, de modo que las dis-

tancias de las bocinas hacia ti difieran por media longitud de onda,

entonces las rarefacciones de una bocina se llenan con las compresio-

nes provenientes de la otra bocina. Esto es interferencia destructiva.

Es como si la cresta de una ola llenara exactamente el valle de otra

ola, con lo que se cancelan ambas. Si la región está desprovista de

(a)

(b)

cualquier superficie reflejante, ¡se escuchará poco o ningún sonido!

FIGURA 20.18

Si las bocinas emiten todo un rango entero de sonidos con distintas frecuencias, Interferencia de ondas sonoras.

sólo algunas ondas interfieren de modo destructivo para una diferencia dada en las (a) Las ondas llegan en fase e interfie-longitudes de las trayectorias. Entonces, la interferencia de este tipo no suele ser un ren de modo constructivo cuando las

problema, porque en general hay suficiente reflexión de sonido para llenar los puntos longitudes de las trayectorias desde las

cancelados. No obstante, los "puntos ciegos" en ocasiones son evidentes en teatros o bocinas son iguales.

(b) Las ondas llegan fuera de fase e

salas de concierto con diseños deficientes, donde las ondas sonoras se reflejan en las interfieren de modo destructivo cuando

paredes e interfieren con las ondas no reflejadas y producen zonas de baja amplitud.

las longitudes de las trayectorias difieren Cuando mueves la cabeza unos centímetros en cualquier dirección, puedes escuchar en media longitud de onda (o 3/2, 5/2,

una diferencia considerable.

etcétera).

La interferencia sonora se ilustra de manera sorprendente cuando el sonido monoaural se reproduce en bocinas estéreo que están fuera de fase. Las bocinas están fuera de fase cuando los alambres de entrada a una bocina se intercambian (se invierten los alambres de entrada positivo y negativo). Para una señal monoaural, esto significa que, cuando una bocina envía una compresión de sonido, la otra envía una rarefacción. El sonido producido no es tan pleno ni tan intenso como el proveniente de bocinas

conectadas

adecuadamente en fase, porque las ondas más largas se cancelan por interferencia. Esto se ilustra en la Figura 20.19. Las ondas más cortas se cancelan a medida que las bocinas se acercan, y cuando el par de bocinas se pone frente a frente una contra otra, ¡se escucha muy poco sonido! Sólo las ondas sonoras que tienen las frecuencias más altas sobreviven a la cancelación. Tienes que intentarlo para apreciarlo.

La interferencia sonora destructiva es una propiedad útil en la tecnología ***F I G U R A 2 0 . 1 9***

antirruido. Los dispositivos ruidosos, como los martillos neumáticos, están Si se intercambian los alambres de entra-equipados con micrófonos que envían el sonido del dispositivo a microchips electróni- da positivo y negativo de una de las boci-cos que crean imágenes especulares de los patrones de onda de las señales sonoras. Para nas estéreo, las bocinas están fuera de el martillo neumático, esta señal sonora especular se alimenta a audífonos que utiliza el fase. Cuando las bocinas están separadas, operador. Las compresiones (o rarefacciones) sonoras del martillo se cancelan mediante el sonido monoaural no es tan intenso como el proveniente de las bocinas en

rarefacciones (o compresiones) especulares en los audífonos. La combinación de seña- fase apropiada. Cuando se ponen frente les cancela el ruido del martillo neumático. Los audífonos antirruido ya son comunes a frente, se escucha muy poco sonido. ¡La para los pilotos (como los que usa Ken, fotografiado al comienzo de este capítulo). Las interferencia es casi completa conforme cabinas de algunos aviones ahora se silencian con tecnología antirruido. Cuando no se las compresiones de una bocina llenan las silencian, debes usar tus audífonos antirruido.

rarefacciones de la otra!

P U N T O D E C O N T R O L

En la demostración de la Figura 20.19, ¿por qué es importante usar sonido monoaural?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Puedes cancelar las señales si son idénticas, no las diferentes señales que alimentan las bocinas estéreo. Señales idénticas alimentadas a ambas bocinas producen un soni-F I G U R A 2 0 . 2 0

do monoaural, justo lo que necesitas para máxima interferencia destructiva cuando Cuando una imagen especular de una

señal sonora se combina con el sonido

cambias las fases de las señales monoaurales.

en sí, el sonido se cancela.

***20.8** Batimientos*

Cuando suenan juntos dos tonos con una frecuencia un poco diferente, se escucha una fluctuación en la intensidad de los sonidos combinados; el

sonido es intenso, luego débil, luego intenso, luego débil y así sucesivamente. Esta variación periódica en la intensidad del sonido se llama ***batimiento*** *y se debe a la interferencia. Golpea dos diapasones* ***VIDEO: Interferencia y batimientos***

ligeramente no coincidentes y, dado que un diapasón vibra con diferente frecuencia que el otro, las vibraciones de los diapasones por un momento estarán en fase, luego fuera de fase, luego en fase de nuevo y así sucesivamente. Cuando las ondas combinadas llegan a tus oídos en fase (por decir, cuando una compresión de un diapasón se traslapa con una compresión del otro) el sonido es un máximo. Un momento después, cuando los diapasones están fuera de fase, una compresión de un diapasón se encuentra con una rarefacción del otro, lo que resulta en un mínimo. El sonido que llega a tus oídos palpita entre una intensidad máxima y una mínima y produce un efecto trémolo.

Para entender los batimientos, piensa en un conejo alto y un conejo bajo que saltan lado a lado. El conejo bajo cubre menos terreno en cada salto, de modo que debe saltar con más rapidez; esto es, con mayor frecuencia, para mantener el paso del conejo alto.

Si los conejos están "en sincronía" en un momento particular, aterrizan juntos, luego, un poco después, estarán "fuera de sincronía", y aterrizarán en momentos un poco diferentes. ¿Cuánto tiempo transcurrirá hasta que vuelvan a estar en sincronía? Imagina ***F I G U R A 2 0 . 2 1***

La interferencia de dos fuentes sonoras

con frecuencias un poco diferentes

produce batimientos.

Destructiva

Constructiva

Constructiva

que el conejo alto da 70 saltos en 1 minuto, y que el conejo más bajo da 72 saltos en el mismo tiempo. Después de 6 segundos (0.1 min) habrán dado 7 y 7.2 saltos, respectivamente, y no estarán en sincronía. No es sino hasta que hayan transcurrido 30 segundos (0.5 min), cuando hayan dado, respectivamente, 35 y 36 saltos (un número entero para ambos), que aterrizarán juntos de nuevo. Luego, después de 1 minuto (70 y 72

saltos), estarán de nuevo en sincronía. Y así sucesivamente. Dos veces por minuto los conejos estarán en sincronía. En general, si dos criaturas con diferentes tasas de salto viajan juntas, el número de veces que están en sincronía cada minuto (u otra unidad de tiempo) será igual a la diferencia en las frecuencias de sus saltos. Esta idea también se aplica al par de diapasones. Si un diapasón experimenta 264 vibraciones cada segundo y el otro diapasón vibra 262 veces por segundo, entonces vibrarán en sincronía y se reforzarán entre sí dos veces cada segundo. Se escuchará una frecuencia de batimiento ***F I G U R A 2 0 . 2 2***

de 2 hertz. (La altura global corresponderá a la frecuencia promedio, 263 hertz.) Los desiguales espaciamientos de los pei-Si encimas dos peines con diferente espaciamiento entre los dientes, verás un patrón de nes producen un patrón de Moiré que es Moiré que se relaciona con los batimientos (Figura 20.22). El número de batimientos por similar a los batimientos.

longitud será igual a la diferencia en el número de dientes por longitud

para los dos peines.

Los batimientos pueden ocurrir con cualquier tipo de onda y constituyen una forma práctica de comparar frecuencias. Para afinar un piano, por ejemplo, un afinador de pianos escucha los batimientos producidos entre una frecuencia estándar y la frecuencia de una cuerda particular en el piano. Cuando las frecuencias son idénticas, los batimientos desaparecen. Los batimientos pueden ayudarte a afinar varios instrumentos musicales.

Tan sólo escucha los batimientos entre el tono de tu instrumento y un tono estándar producido por un piano o algún otro instrumento.

TRANSMISIONES DE RADIO

U n receptor de radio convierte ondas electromagnéticas, FM transmiten en el intervalo de mayor frecuencia de 88-108

que no puedes escuchar, en ondas sonoras que puedes

megahertz. La amplitud modulada es similar a cambiar rápidamente

escuchar. Toda estación de radio tiene una frecuencia

el brillo de una bombilla de color constante. La frecuencia

asignada en la cual transmite. La onda electromagnética transmitida

modulada es como cambiar rápidamente el color de una bombilla

a esta frecuencia es la onda portadora. La señal sonora que se va a de intensidad constante.

transmitir tiene una frecuencia relativamente baja y se superpone

Girar la perilla de un receptor de radio para seleccionar una

sobre la onda portadora con una frecuencia mucho mayor en dos

estación particular es como ajustar masas móviles sobre los brazos de formas principales: mediante ligeras variaciones en la amplitud

un diapasón para hacerlo resonar con el sonido producido por otro

que coinciden con la frecuencia de audio o mediante ligeras

diapasón. Cuando eliges una estación de radio, ajustas la frecuencia

variaciones en la frecuencia. Esta impresión de la onda sonora sobre

de un circuito eléctrico dentro del receptor de radio para hacerlo

la onda de radio de mayor frecuencia es la modulación. Cuando coincidir y resonar con la frecuencia de la estación deseada. Eliges

se modula la amplitud de la onda portadora, se le llama AM, o una onda portadora de entre muchas. Entonces la señal sonora

amplitud modulada. Las estaciones AM transmiten en el intervalo impresa se separa de la onda portadora, se amplifica y alimenta la

de 535-1,605 kilohertz. Cuando se modula la frecuencia de la onda bocina. ¡Es bueno escuchar sólo una estación a la vez!

portadora, se le llama FM, o frecuencia modulada. Las estaciones AM

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

FM

F I G U R A 2 0 . 2 3

Señales de radio AM y FM. (a) Ondas sonoras que entran en un micrófono. (b) Onda portadora de radiofrecuencia producida por un transmisor sin una señal sonora. (c) Onda portadora modulada por la señal. (d) Interferencia estática. (e) Onda portadora y señal afectada por estática. (f) El receptor de radio corta la mitad negativa de la onda portadora. (g) La señal restante es rugosa para AM debido a la estática, pero es lisa para FM porque las puntas de la forma de onda se cortan sin pérdida de señal.

C A PÍ T U LO 20 R E V ISI Ó N

387

Los delfines utilizan los batimientos para sondear los movimientos de las cosas que los rodean. Cuando un delfín envía señales sonoras, pueden producirse batimientos cuando los ecos que recibe el delfín interfieren con el sonido que envía. Cuando no

¿Por qué Hollywood sigue repro-

hay movimiento relativo entre el delfín y el objeto que regresa el sonido, las frecuencias duciendo ruidos de motor siempre

enviada y recibida son iguales y no ocurren batimientos. Pero cuando hay movimiento que una nave espacial se mueve

relativo, el eco tiene una frecuencia diferente debido al efecto Doppler, y se producen en el espacio exterior? ¿No sería

batimientos cuando se combinan el eco y el sonido emitido. El mismo principio se mucho más espectacular verlas

flotar en silencio?

aplica en las pistolas de radar que utilizan los oficiales de policía. Los batimientos entre la señal que envían y la que se refleja permiten determinar la rapidez de un automóvil.

Una aplicación intrigante de los batimientos, y que salva vidas, se usa en la detección de gases peligrosos en las minas. El aire en algunas minas contiene metano venenoso.

Existe una pequeña diferencia en la rapidez del sonido en aire puro y en el aire que contiene metano. Cuando un par de pequeños tubos idénticos se soplan juntos, uno con aire puro de un depósito y el otro con el aire de la mina, se escuchan batimientos si el aire contiene metano. Si trabajas en una mina, ¡hazlo en una donde no se escuchen batimientos cuando realices este procedimiento!

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Cuál es la frecuencia de batimiento cuando suenan juntos un diapasón de 262 Hz y uno de 266 Hz? ¿Uno de 262 Hz y uno de 272 Hz?

2. ¿Es correcto decir que, en todos los casos, sin excepción, cualquier onda de radio viaja más rápido que cualquier onda sonora?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Para los diapasones de 262 Hz y 266 Hz, el oído escuchará 264 Hz, que batirán a 4 Hz (266 Hz – 262 Hz). Para los diapasones de 262 Hz y 272 Hz, se escucharán 267 Hz, y algunas personas lo escucharán vibrar 10 veces cada segundo (272 Hz – 262 Hz). Las frecuencias de batimiento mayores que 10 Hz por lo general son demasiado rápidas para ser escuchadas.*

2. *Sí, porque cualquier onda de radio es una onda electromagnética y viaja con la rapidez de la luz. Una onda sonora, por otra parte, es una onda mecánica que viaja en el aire a unos 340 m/s, alrededor de una millonésima la rapidez de una onda de radio. De modo que cualquier onda de radio viaja mucho más rápido que cualquier onda sonora.*

R E S U M E N D E T É R M I N O S *(C O N O C I M I E N T O)*
Altura (tono). *Lo alto o lo bajo de un tono; relacionado con la*
Reverberación. *Persistencia del sonido, como en un eco, debida frecuencia de la onda.*

a reflexiones múltiples.

Infrasónico. *Describe un sonido que tiene una frecuencia muy*
Refracción. *Doblamiento del sonido o cualquier onda causado*

baja para ser escuchada por el oído humano normal.

por una diferencia en las rapideces de onda.

Ultrasónico. *Describe un sonido que tiene una frecuencia muy* ***Vibración forzada.*** *Establecimiento de vibraciones en un obje-alta para ser escuchada por el oído humano normal.*

to mediante una fuerza de vibración.

Compresión. *Región condensada del medio a través del cual*

Frecuencia natural. *Frecuencia a la cual un objeto elástico*

viaja una onda longitudinal.

tiende a vibrar cuando se le perturba y se retira la fuerza

Rarefacción. *Región rarificada (de presión reducida) del medio perturbadora.*

a través del cual viaja una onda longitudinal.

Resonancia. *Respuesta de un cuerpo cuando una frecuencia*

interferencia destructiva resulta de la cancelación entre una

forzada coincide con su frecuencia natural.

cresta y un val e.

Interferencia. *Resultado de superponer diferentes ondas, a*

Batimientos. *Serie de reforzamientos y cancelaciones alterna-menudo de la misma longitud de onda. La interferencia*

dos producidos por la interferencia de dos ondas con fre-

constructiva resulta del reforzamiento entre cresta y cresta; la

cuencias un poco diferentes, que se escucha como un efecto

de palpitación en ondas sonoras.

PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

20.1 La naturaleza del sonido

18. ¿Por qué el sonido a veces se refracta bajo el agua?

1. ¿Cómo se relaciona el sonido con la energía?

19. ¿Qué es el ultrasonido?

2. ¿Cuál es la relación entre la frecuencia y altura?

20.5 Vibraciones forzadas

3. ¿Cuál es el rango promedio de audición de una persona joven?

20. ¿Por qué un diapasón golpeado suena más fuerte cuando se sostiene en una mesa?

4. Distingue entre ondas sonoras infrasónicas y ultrasónicas.

21. Indica al menos dos factores que determinen la frecuencia natural de un objeto.

5. En relación con los sólidos y los líquidos, ¿cómo se clasifica el aire como conductor del sonido?

6. ¿Por qué el sonido no viaja en el vacío?

20.6 Resonancia

22. ¿Cómo es que las vibraciones forzadas se relacionan con la resonancia?

20.2 El sonido en el aire

7. Distingue entre una compresión y una rarefacción.

23. Cuando escuchas el radio, ¿por qué sólo escuchas una estación a la vez en lugar de escuchar todas las estaciones

8. ¿Las compresiones y las rarefacciones viajan en la misma

dirección, o en dirección opuesta, en una onda?

al mismo tiempo?

9. ¿De qué factores depende la rapidez del sonido? ¿Cuáles

24. ¿Cómo es que la resonancia generada por el viento afectó

son algunos factores de los que no depende?

el puente Tacoma Narrows en el estado de Washington

10. ¿Cuál es la rapidez del sonido en aire seco a 20C?

en 1940?

11. ¿El sonido viaja más rápido en aire caliente que en aire frío?

20.7 Interferencia

12. ¿Usualmente qué es mayor: la energía en el sonido ordi-

nario o la energía en la luz ordinaria?

25. ¿Cuándo es posible que una onda cancele a otra?

13. A final de cuentas, ¿en qué se convierte la energía del

26. ¿Qué tipo de ondas pueden mostrar interferencia?

sonido en el aire?

27. ¿Cuál es el resultado de que una imagen especular de una

señal de sonido se combine con el sonido original?

20.3 Reflexión del sonido

20.8 Batimientos

14. ¿Qué es un eco?

15. ¿Qué es una reverberación?

28. ¿Qué fenómeno físico sirve de base a la producción de

batimientos?

20.4 Refracción del sonido

29. ¿Qué frecuencia de batimiento ocurrirá cuando suenen

16. ¿Cuál es la causa de la refracción?

juntas fuentes sonoras de 370 Hz y 374 Hz?

17. ¿El sonido tiende a doblarse hacia arriba o hacia abajo

30. ¿Cómo difiere una onda de radio de una onda sonora?

cuando su rapidez es menor cerca del suelo?

P I E N S A Y R E A L I Z A *(A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 31. En la tina, sumerge la cabeza y escucha el sonido que haces*

32. Coloca un trozo de globo de caucho, no muy estirado,

cuando chocas las uñas o golpeas la tina bajo la superficie

sobre la bocina de un radio. Pega un pequeño espejo muy

del agua. Compara con el sonido que haces cuando tanto

ligero, papel aluminio o metal pulido cerca de uno de los

la fuente como tus oídos están arriba del agua. Con el ries-

bordes. Proyecta un estrecho haz de luz sobre el espejo

go de mojar el suelo, deslízate de ida y vuelta en la tina con

mientras suena tu música favorita y observa los hermosos

diferentes frecuencias y observa cómo la amplitud de las

patrones que se reflejan sobre una pantalla o la pared.

ondas de desplazamiento se

acumula con rapidez cuan-

Membrana de caucho

do te deslizas al ritmo de las

estirada sobre la bocina

ondas. (El último proyecto

es más efectivo cuando estás

solo en la tina.)

Fuente de luz

Espejo

Área de

visualización

C A PÍ T U LO 20 R E V ISI Ó N

389

P I E N S A Y R E S U E L V E *(A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 33. ¿Cuál es la longitud de onda de un tono de 340 Hz*

36. Un murciélago que vuela en una cueva emite un sonido

en aire a temperatura ambiente? ¿Cuál es la longitud

y recibe su eco 0.1 s después. Demuestra que su distancia

de onda de una onda ultrasónica de 34,000 Hz en el

respecto de la pared de la cueva es de 17 m.

mismo aire?

37. Observas a la distancia a Sally Constructora clavando cla-

34. Durante años, los científicos marinos estuvieron descon-

vos en un porche frontal a una tasa regular de 1 golpe por

certados por las ondas sonoras detectadas con micrófo -

segundo. Escuchas el sonido de los golpes sincronizados

nos submarinos en el Océano Pacífico. Las llamadas

de manera exacta con los golpes que ves. Y luego escuchas

ondas T estaban entre los sonidos más puros de la natu-

un golpe más después de ver que deja de martillar. Explica
raleza. Con el tiempo, los científicos rastrearon la fuente
cómo calculas que Sally está a 340 m de distancia de ti.
y la encontraron en los volcanes submarinos, cuyas
38. Imagina a alguien con el tipo de Rip van Winkle que vive
columnas de burbujas ascendentes resonaban como los
en un valle. Justo antes de irse a dormir, grita "DESPIER-
tubos de un órgano. ¿Cuál es la longitud de onda de una
TA", y el sonido hace eco en la montaña más cercana y
onda T típica cuya frecuencia es de 7 Hz? (La rapidez del
regresa 8 horas después. Demuestra que la distancia entre
sonido en agua de mar es 1,530 m/s.)
Rip y la montaña imaginaria es de casi 5,000 km (aproxi-
35. Una embarcación que explora las profundidades
madamente la distancia de Nueva York a San Francisco).
oceánicas sondea el suelo marino con ondas ultrasónicas
39. ¿Qué frecuencias de batimiento son posibles con diapaso-
que viajan a 1,530 m/s en agua de mar. La demora
nes de frecuencias de 256, 259 y 261 Hz?
temporal del eco hacia el fondo marino y de vuelta es de
40. Una marsopa gruñidora emite sonido a 57 Hz. ¿Cuál es
6 s. Demuestra que la profundidad del agua directamente
la longitud de onda de este sonido en agua, donde la rapi-
abajo de la embarcación es de 4,590 m.

dez del sonido es de 1,500 m/s?

***P I E N S A Y C L A S I F I C A** (A N Á L I S I S)*

41. Clasifica la rapidez del sonido a través de estos materiales,

42. Clasifica la frecuencia de batimiento, de la más alta a la

de mayor a menor:

más baja, para los siguientes pares de sonidos:

a. Aire

a. 132 Hz, 136 Hz

b. Acero

b. 264 Hz, 258 Hz

c. Agua

c. 528 Hz, 531 Hz

d. 1,056 Hz, 1,058 Hz

***P I E N S A Y E X P L I C A** (S Í N T E S I S)*

43. ¿Por qué no escuchas el sonido de los fuegos artificiales

53. En las gradas de una pista de carreras, observas el humo de

distantes hasta después de haberlos visto?

la pistola de salida antes de escuchar el disparo. Explica.

44. Si la Luna explotara, ¿por qué no lo escucharías?

54. En las competencias olímpicas, un micrófono detecta el

45. ¿Por qué sería inútil tratar de detectar sonidos de otros

sonido de la pistola de salida y la envía eléctricamente

planetas, incluso con los mejores detectores de audio?

a las bocinas del bloque de salida de cada corredor.

46. Si lanzas una piedra en agua apacible, se forman círculos

¿Por qué?

concéntricos. ¿Qué forma tendrán las ondas si lanzas una

55. Cuando una onda sonora pasa por un punto en el aire,

piedra en agua que fluye suavemente?

¿hay cambios en la densidad del aire en este punto?

47. ¿Por qué zumban las abejas que vuelan?

Explica.

48. Un gato puede escuchar frecuencias sonoras de hasta

56. En el instante en que se crea una región de presión alta

70,000 Hz. Los murciélagos envían y reciben chillidos

justo afuera de los brazos de un diapasón en vibración,

de ultraalta frecuencia de hasta 120,000 Hz. ¿Cuáles

¿que se creará adentro, entre los brazos?

escuchan un sonido con longitudes de onda más cortas:

57. ¿Por qué después de una nevada todo parece tan callado?

los gatos o los murciélagos?

58. Si una campana tañe dentro de una campana de vidrio,

49. ¿Qué significa decir que una estación de radio está “en el

ya no puedes escucharla cuando se vacía el aire, pero

101.1 de tu sintonizador FM"?

todavía puedes verla. ¿Qué diferencias en las propiedades

50. Supón que una onda sonora y una onda electromagnética

del sonido y de la luz indica esto?

tienen la misma frecuencia. ¿Cuál tiene la longitud de

59. ¿Por qué la Luna se describe como un "planeta silencioso"?

onda más larga?

60. Si la rapidez del sonido dependiera de su frecuencia, ¿disfru-

51. El sonido proveniente de la fuente A tiene el doble de

tarías un concierto sentado en el segundo balcón? Explica.

frecuencia que el sonido de la fuente B. Compara las lon-

61. Si la frecuencia del sonido se duplica, ¿qué cambio ocurri-

gitudes de onda del sonido proveniente de las dos fuentes.

rá en su rapidez? ¿En su longitud de onda?

52. ¿Qué ocurre con la longitud de onda del sonido cuando

62. ¿Por qué el sonido viaja más lento en el aire frío que en el

aumenta la frecuencia?

aire caliente?

63. ¿La refracción del sonido sería posible si la rapidez del

cuando nunca las pulse el músico. Estas "cuerdas simpáti-

sonido no se modificara con el viento, la temperatura y

cas" son idénticas a las cuerdas pulsadas y se montan bajo

otras condiciones? Defiende tu respuesta.

ellas. ¿Cuál es tu explicación?

64. ¿Por qué el temblor del suelo por una explosión distante puede

76. ¿Por qué una pista de baile se mueve sólo cuando se reali-

sentirse antes de poder escuchar el sonido de la explosión?

zan ciertos tipos de pasos de baile?

65. ¿Qué tipo de condiciones de viento harían que el sonido

77. Un dispositivo especial puede transmitir sonido fuera de

se escuchara con más facilidad a largas distancias?

fase desde un martillo neumático ruidoso a su operador

¿Qué se escuchará con menos facilidad a largas distancias?

que usa audífonos. Sobre el ruido del martillo neumático,

66. Si la distancia respecto de un clarín se triplica, ¿en qué

el operador puede escuchar con facilidad tu voz aunque

factor disminuye la intensidad del sonido? Supón que no

tú no puedes escuchar la suya. Explica.

hay reflexiones que afecten el sonido.

78. Un objeto resuena cuando la frecuencia de una fuerza

67. ¿Por qué un eco es más débil que el sonido original?

de vibración coincide con su frecuencia natural o es

68. Si una sola perturbación a una distancia desconocida

un submúltiplo de su frecuencia natural. ¿Por qué no

emite ondas tanto transversales como longitudinales que

resonará a múltiplos de su frecuencia natural? (Sugerencia:

viajan con rapideces evidentemente diferentes en el medio,

piensa en cuando empujas a un niño en un columpio.)

como en el suelo durante un terremoto, ¿cómo puede

79. ¿Cómo es que cierta nota cantada por un cantante puede

determinarse la distancia respecto de la perturbación?

romper una copa de cristal?

69. ¿Qué par de errores físicos ocurren en una película de cien-

80. ¿Los batimientos son el resultado de la interferencia, del

cia ficción que muestra una explosión distante en el espacio

efecto Doppler, o de ambos?

exterior y tú ves y escuchas la explosión al mismo tiempo?

81. ¿Es correcto decir que los batimientos del sonido son muy

70. ¿Por qué quienes marchan al final de un largo desfile

parecidos al rítmico "compás" de la música? Defiende tu*

detrás de una banda estarán fuera de ritmo con quienes

respuesta.

marchan cerca del frente?

82. Dos ondas sonoras de la misma frecuencia pueden interfe-

71. ¿Por qué romper el paso al marchar sobre un puente es un

rir pero, con la finalidad de producir batimientos, las dos

procedimiento prudente para los soldados?

ondas sonoras deben tener frecuencias diferentes. ¿Por qué?

72. ¿Por qué el sonido de un arpa es suave en comparación

83. Supón que un afinador de piano escucha 3 batimientos

con el sonido de un piano?

por segundo cuando escucha el sonido combinado de

73. Tu compañero de clase dice que la rapidez del sonido y la
un diapasón y la cuerda del piano que afina. Después
frecuencia del sonido dependen del medio en el que viaja.
de apretar un poco la cuerda, escucha 5 batimientos por
¿Con qué parte de este enunciado no estás de acuerdo?
segundo. ¿Debe aflojar o apretar la cuerda?
74. Quienes viven en departamentos darán testimonio de
84. Un afinador de pianos usa un diapasón de 264 Hz y
que las notas bajas se escuchan de manera más clara en
escucha 4 batimientos por segundo. ¿Cuáles son las dos
la música que tocan los departamentos vecinos. ¿Por qué
posibles frecuencias de vibración de la cuerda del piano?
supones que los sonidos con frecuencia más baja viajan
85. Un ser humano no puede escuchar sonido a una
con más facilidad a través de paredes, pisos y techos que
frecuencia de 100 kHz o sonido a 102 kHz. Pero si
los sonidos con frecuencia alta?
camina hacia una habitación en la que dos fuentes emiten
75. La cítara, un instrumento musical de India, tiene un
ondas sonoras, una a 100 kHz y la otra a 102 kHz,
conjunto de cuerdas que vibran y producen música, aun
escuchará un sonido. Explica.

P I E N S A Y D I S C U T E *(E V A L U A C I Ó N)*

86. A medida que viertes agua en un vaso, golpea en forma

89. Una regla empírica para calcular la distancia en

repetida el vaso con una cuchara. Conforme se llena el

kilómetros entre un observador y un relámpago es dividir

vaso que golpeas, ¿la altura del sonido aumenta o dismi-

entre 3 el número de segundos en el intervalo entre el

nuye? (Discute qué harías para responder esta pregunta.)

destello y el sonido. ¿Esta regla es correcta? Discute la

87. Analiza por qué el sonido viaja más rápido en aire húmedo.

razón por la que es correcta o incorrecta.

(Observa que, a la misma temperatura, las moléculas de

90. Un par de bocinas a ambos lados de un escenario emiten

vapor de agua tienen la misma energía cinética promedio

tonos puros idénticos (tonos de frecuencia fija y longitud

que las moléculas más pesadas de nitrógeno y oxígeno

de onda fija en el aire). Cuando estás de pie en el pasillo

en el aire.) ¿Cómo, entonces, se comparan las rapideces

central, a la misma distancia de las dos bocinas, escuchas

promedio de las moléculas de H O con las rapideces de las

el sonido fuerte y claro. ¿Por qué la intensidad del sonido

2

mo léculas de N y O ?

disminuye mucho cuando te vas hacia un lado? (Sugeren-

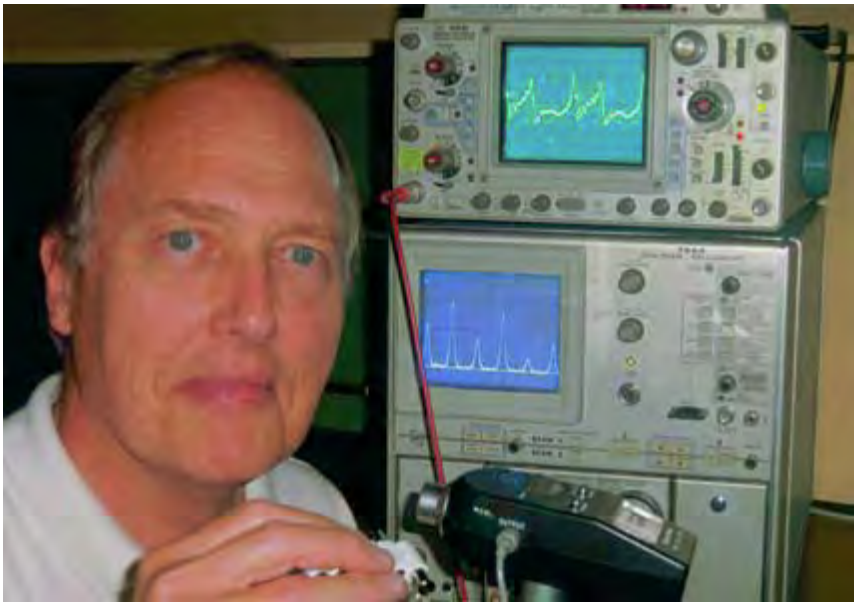
2

2

88. Las ondas ultrasónicas tienen muchas aplicaciones en la tecnología y en la medicina. Una ventaja es que pueden usarse grandes intensidades sin peligro para el oído. Cita otra ventaja de su longitud de onda corta. (Sugerencia: ¿Por qué los microscopistas utilizan luz azul en lugar de luz blanca para ver detalles?)

91. Cuando dos bocinas fuera de fase se acercan como se muestra en la Figura 20.19, ¿cuáles ondas se cancelan más: las ondas largas o las ondas cortas? Defiende y discute tu respuesta.

**El autor juega con la palabra beat: beats, batimientos; beat, ritmo, compás.*



21 ***1***

C A P Í T U L O 2 1

Sonidos

musicales ***2***

21.1 Ruido y música

21.2 Altura

3

21.3 Intensidad del sonido y sonoridad

21.4 Calidad

21.5 Instrumentos musicales

21.6 Análisis de Fourier

21.7 De analógico a digital

4

1 *Gracie Hewitt produce tonos apacibles con su clarinete.*

2 *Norm Whitlatch muestra los primeros cinco armónicos, en*

el osciloscopio inferior, a partir de un análisis de Fourier del

sonido del diapasón de una guitarra, que se muestra en la traza

verde del osciloscopio superior. ***3*** *Michelle Anna Wong y*

Miriam Dijamco deleitan al público cuando deslizan los arcos

por las cuerdas de sus violines. ***4*** *La cantante y física, Lynda Williams, instructora de física en Santa Rosa Junior College,*

deleita a las audiencias con sus canciones sobre física.

en su expedición egipcia y fue nombrado gobernador del bajo Egipto. Aislado de Francia por la flota inglesa,

¿ Qué tiene que ver la física con la música? ¡MUCHO!

Desde tiempos antiguos, los científicos han visto una relación muy cercana entre la música y las mate-

Fourier organizó los talleres donde el ejército francés se

máticas. Uno de estos matemáticos y físicos fue Jean Bap-

apoyó para proveerse sus municiones de guerra. En aque-

tiste Joseph Fourier, quien nació en Francia en 1768. Fue

lla época también contribuyó con varios ensayos matemá-

hijo de un sastre y quedó huérfa-

ticos al instituto que fundó Napoleón, el Instituto del

no a los 10 años de edad. Fourier

Cairo. Después de las victorias inglesas, Fourier regresó

mostró signos de gran brillantez,

a Francia, donde realizó experimentos sobre la propaga-

pero al no ser de "buena cuna", ción del calor. Descubrió que la suma de las funciones fue inelegible para una comisión trigonométricas simplificaba enormemente el estudio de que buscó en los cuerpos científ-la propagación del calor.

ficos del ejército. En vez de ello,

Fourier descubrió una regularidad matemática en las

aceptó un puesto de profesor mili-

partes que componen cualquier tipo de movimiento ondu-

tar y se convirtió en maestro de latorio periódico. Descubrió que incluso las ondas perió-matemáticas.

dicas más complejas pueden descomponerse en simples

En su distrito natal, Fourier tuvo una participación ondas sinusoidales que se suman. Lo que descubrió en destacada en la promoción de la Revolución Francesa. A

1822 se llama en la actualidad análisis de Fourier. En este

los 30 años de edad participó con Napoleón Bonaparte

capítulo verás cómo se aplica esto a los sonidos musicales.

***21.1** Ruido y música*

Casi todos los sonidos que escuchas son ruidos. El impacto de un objeto que cae, el golpe de una puerta, el rugido de una motocicleta y la mayoría de los sonidos del tráfico en las calles de la ciudad son ruidos. El ruido corresponde a una vibración irregular del tímpano producida por alguna vibración irregular en tu entorno, un revoltijo de longitudes de onda y amplitudes. El ruido blanco es una mezcla de varias frecuencias de sonido, tal como la luz blanca es una mezcla de todas las frecuencias de luz. El sonido de la marea, de las hojas que crujen o del agua que burbujea en un arroyo se describe como ruido blanco.

La música es el arte del sonido y tiene un carácter diferente. Los sonidos musicales tienen tonos periódicos, o notas musicales. Aunque el ruido no tiene estas características, la línea que separa la música del ruido puede ser delgada y subjetiva. Para algunos compositores contemporáneos, no existe. Algunas personas consideran a la música contem-poránea y a la música de otras culturas como ruido. Diferenciar estos tipos de música del ruido se vuelve un problema de estética. Sin embargo, distinguir la música tradicional (esto es, la música clásica occidental y la mayoría de los tipos de música popular) del ruido no plantea ningún problema. Una persona con pérdida auditiva total podría distinguir entre éstas con un osciloscopio, como lo muestra Norm Whitlatch en la segunda Presión

Ruido

de las fotografías al inicio del capítulo. Cuando una señal eléctrica proveniente de un micrófono se alimenta a un osciloscopio, los patrones de variaciones en la presión del aire con el tiempo se despliegan bastante bien, lo que permite distinguir entre el ruido y Presión

Música

la música tradicional (Figura 21.1).

Los músicos por lo general hablan de tonos musicales en términos de tres caracte-F I G U R A 2 1 . 1

rísticas principales: altura o tono, sonoridad y calidad.

Representaciones gráficas del ruido y la

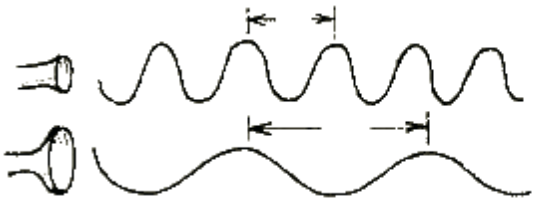
música.

P U N T O D E C O N T R O L

Un golpe seco hace ruido. ¿Una serie de golpes secos puede ser musical?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Sí, especialmente cuando se repiten con regularidad... piensa en un solo de tambor.



C A PÍ T U LO 21 SO N I DOS M USI C A L ES

393

21.2 *Altura*

La música está organizada en muchos niveles diferentes. Los más notables son las notas musicales. Tú las recuerdas desde tus primeros años de escuela como "do, re, mi, fa, sol, la, si y do". Cada nota tiene su propia ***altura****. La altura puede describirse por la frecuencia. Las vibraciones rápidas de la fuente sonora (frecuencia alta) producen un sonido con una gran altura, es decir, un sonido agudo; en tanto que las vibraciones lentas (frecuencia baja) producen una altura baja, es decir, un sonido grave. A menudo se habla de la altura de un sonido en términos de su posición en la escala musical. En Estados Unidos y otros países, los músicos asignan a las diferentes alturas letras distintas: A, B, C, D, E, F, G.* Cuando la (A), llamada también nota "la 440", se toca en un piano, un martillo golpea dos o tres cuerdas, cada una de las cuales vibra 440 veces en 1 segundo. La altura de la 440 corresponde a 440 hertz.1 Las notas de la (A) a sol (G) son todas notas dentro de una octava. Multiplica la frecuencia de cualquier nota por 2*

y tendrás la misma nota a una altura mayor en la siguiente octava. Un teclado de piano cubre un poco más de siete octavas (Figura 21.2).

C1

C2

C3

C4

C5

C6

C7

C8

32.70 Hz

65.41 Hz

130.31 Hz

261.63 Hz

523.25 Hz

1046.5 Hz

2093.0 Hz

4186.0 Hz

F I G U R A 2 1 . 2

Teclado de piano. El do bajo (C) es de 32.70 Hz y los sobretonos sucesivos de do se duplican en 1

frecuencia. El do de 261.63 Hz se llama do medio.

Para obtener las diferentes notas musicales se cambia la frecuencia de la fuente de sonido en vibración. Por lo general, esto se hace al alterar el tamaño, la tensión o la masa del objeto en vibración. Un guitarrista o violinista, por ejemplo, ajusta la tensión de las cuerdas cuando las afina.

Entonces puede reproducir diferentes notas cuando altera la longitud de

cada cuerda al "detenerla" con los dedos. En los instrumentos de aliento, puede alterarse la longitud de la columna de aire en vibración (trombón y trompeta) ***F I G U R A 2 1 . 3***

o pueden abrirse y cerrarse los orificios a los lados del tubo en varias combinaciones Ambas ondas sonoras viajan con la misma rapidez. La que tiene la longitud

(saxofón, clarinete y flauta) para cambiar la altura de la nota producida.

de onda más corta l llega al oído del

Los sonidos agudos que se usan en música casi siempre son menores a 4,000 Hz, escucha con más frecuencia. Por tanto, pero algunas personas jóvenes pueden escuchar sonidos con frecuencias de hasta tiene una frecuencia más alta y se escu-20,000 Hz. Algunas personas y la mayoría de los perros pueden escuchar tonos con cha como una altura mayor.

alturas superiores a esto. En general, el límite superior de audición de la gente disminuye con la edad. Un sonido muy agudo a menudo es inaudible para un adulto mayor y, sin embargo, puede ser escuchado con claridad por alguien más joven. Esto se debe al envejecimiento de los capilares sensibles en el órgano de Corti del oído. La audición, en especial de las frecuencias más altas, disminuye con la edad.

P U N T O D E C O N T R O L

El sonido emitido por los murciélagos es en extremo intenso. ¿Por qué el ser humano no puede escucharlo?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

La frecuencia del sonido emitido por los murciélagos es más alta de lo que pueden escuchar los seres humanos. De otro modo, ¡el sonido de los murciélagos volvería loca a la gente!

1Es interesante que el la 440 por lo general se defina como 440 Hz. Pero algunas personas lo definen con una frecuencia de apenas 436 Hz o de hasta 448 Hz.

**N.T. Que corresponden, respectivamente, a: la, si, do, re, mi, fa, sol.*

21.3 *Intensidad del sonido y sonoridad*

La ***intensidad*** *del sonido depende de la amplitud de las variaciones de presión en el interior de la onda sonora. (Y, como con todas las ondas, la intensidad es directamente proporcional al cuadrado de la amplitud de onda.) La intensidad se mide en unidades de watts/metro cuadrado. El oído humano responde a intensidades que cubren el enorme intervalo de 1012 W/m2 (el umbral de audición) a más de 1 W/m2 (el umbral de dolor). Debido a que el intervalo es tan grande, las intensidades se escalan en factores de 10, con el apenas audible 1012 W/m2 como la intensidad de referencia, llamada 0*

bel (una unidad en honor a Alexander Graham Bell). Un sonido 10 veces más intenso tiene una intensidad de 1 bel (1011 W/m2) o 10 decibeles. La Tabla 21.1 menciona algunos sonidos y sus intensidades. Un sonido de 10 decibeles es 10 veces más intenso Los tapones de oídos por lo gene-que 0 decibeles, el umbral de audición. Por consiguiente, 20 decibeles es 100, o 102, ral reducen el ruido en aproxima-veces la intensidad del umbral de audición, 30 decibeles es 103 veces el umbral de au-damente 30 dB.

dición y 40 decibeles es 104 veces. De modo que 60 decibeles representa una intensidad sonora un millón de veces (106) mayor que 0 decibeles. ¿Puedes ver que 80 decibeles representa un sonido 102 veces más intenso que 60 decibeles?2

T A B L A 2 1 . 1 FUENTES E INTENSIDADES SONOR AS COMUNES

Fuente de sonido

Intensidad (W/m2)

Nivel sonoro (dB)

La ballena azul emite los sonidos

Avión jet a 30 m de distancia

102

140

más intensos, mayores que 180 dB

en el agua, pero con una altura

Sirena de ataque aéreo, cercana

1

120

demasiado baja como para que el

Música disco, amplificada

$10-1$

110

ser humano los detecte sin equipo

Remachadora

$10-3$

90

sensible.

Calle muy transitada

$10-5$

70

Conversación en casa

10−6

60

Radio a bajo volumen en casa

10−8

40

Murmullo

10−10

20

Crujido de las hojas de un árbol

10−11

10

Umbral de audición

10−12

0

El daño fisiológico a la audición comienza con la exposición a 85 decibeles, y el grado de daño depende de la duración de la exposición y de las características de la frecuencia. El daño de los sonidos intensos puede ser temporal o permanente, dependiendo de si el nervio que termina en el órgano de Corti, el órgano receptor del oído interno, se deteriora o se destruye. Un solo estallido de sonido puede producir vibraciones en el órgano tan intensas que lo rompan. El ruido menos intenso, pero severo, puede interferir en los procesos celulares del órgano y causar su posible rompimiento.

Por desgracia, las células del órgano no se regeneran.

La intensidad sonora es un atributo meramente objetivo y físico de una onda sonora y puede medirse con varios instrumentos acústicos (y el osciloscopio de la Figu-F I G U R A 2 1 . 4

ra 21.4). La ***sonoridad****, por otra parte, es una sensación fisiológica. El*

oído percibe James despliega una señal sonora en un

algunas frecuencias mucho mejor que otras. Un sonido de 3,500 Hz a 80 decibeles, osciloscopio.

por ejemplo, suena cerca de dos veces más sonoro para la mayoría de las personas que un sonido de 125 Hz a 80 decibeles; el ser humano es más sensible al intervalo de frecuencias de 3,500 Hz. Los sonidos más intensos que pueden tolerar los seres humanos tienen intensidades un billón de veces más grandes que los sonidos más débiles. Sin embargo, la diferencia en sonoridad percibida es mucho menor que esta cantidad.

2La escala decibel es una escala logarítmica. La clasificación de los decibeles es proporcional al logaritmo de la intensidad.

C A PÍ T U LO 21 SO N I DOS M USI C A L ES

395

P U N T O D E C O N T R O L

¿La audición se deteriora de manera permanente en los conciertos, clubes o funciones que reproducen música muy intensa?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Sí, dependiendo de cuán intensa, durante cuánto tiempo, cuán cerca y qué tan a menudo. Algunos grupos musicales destacan la sonoridad por encima de la calidad.

Por desgracia, a medida que la audición se va deteriorando, los integrantes del grupo (y sus fanáticos) necesitan sonidos cada vez más intensos para animarse. La pérdida auditiva causada por sonidos es particularmente común en el intervalo de frecuencia de 2,000-5,000 Hz. Recuerda que la audición humana suele ser más sensible alrededor de 3,000 Hz. (¿Buscas una profesión? Considera volverte audiólogo,

¡tendrás mucho trabajo!)

***21.4** Calidad*

Nodo

Nodo

Uno no tiene problemas para distinguir entre el tono de un piano y un tono de la mis-1er. armónico

ma altura de un clarinete. Cada uno de esos tonos tiene un sonido característico que Nodo

Nodo

Nodo

difiere en ***calidad****, el "color" de un tono: el timbre. El timbre describe todos los aspectos 2o. armónico*

de un sonido musical distintos a la altura, la sonoridad y la longitud de tono. El timbre se describe subjetivamente como pesado, ligero, turbio, atenuado, suave o transparen-Nodo

Nodo

Nodo

Nodo

temente claro. El sonido de una viola, por ejemplo, tiene un sonido notablemente "más 3er. armónico

profundo", mientras que el violín tiene un sonido notablemente "más brillante".

La mayoría de los sonidos musicales son una superposición de muchos tonos que Nodo

Nodo

Nodo

Nodo

Nodo

difieren en frecuencia. Los diferentes tonos se llaman ***tonos parciales****, o simplemente 4o. armónico*

parciales. La frecuencia más baja, llamada ***frecuencia fundamental****, determina la altura de la nota. Un tono parcial cuya frecuencia es un*

múltiplo entero de la frecuencia funda- ***F I G U R A 2 1 . 5***

Modos de vibración de una cuerda de

mental se llama ***armónico****. Diferentes armónicos tienen diferentes alturas. Un tono que guitarra.*

tiene el doble de frecuencia de la fundamental es el segundo armónico; un tono con tres veces la frecuencia fundamental es el tercer armónico; y así sucesivamente (Figura 21.5).3

Es la variedad de tonos parciales lo que da a una nota musical su calidad característica.

Así puedes ver que los instrumentos musicales tienen timbres característicos, cada uno con su propio "color".

Fundamental

Por ende, si golpeas el do medio en el piano, produces un tono fundamental con una altura de aproximadamente 262 Hz y también una mezcla de tonos parciales de 2o. armónico

dos, tres, cuatro, cinco, etc., veces la frecuencia del do medio. El número y sonoridad 3er. armónico relativa de los tonos parciales determina la calidad del sonido asociada al piano. El sonido de prácticamente todo instrumento musical consiste en una fundamental y sus Onda

parciales. Los tonos puros, aquellos que tienen sólo una frecuencia, pueden producirse compuesta

electrónicamente. Algunos sintetizadores electrónicos producen tonos puros, y mezclas de estos tonos, para brindar una gran variedad de sonidos musicales.

F I G U R A 2 1 . 6

La frecuencia fundamental y sus armó-

La calidad de un tono está determinada por la presencia e intensidades relativas de nicos se combinan para producir una los diferentes parciales. Los sonidos producidos por cierto tono del piano y un tono onda compuesta.

3En la terminología que se usa con frecuencia en música, el segundo armónico se llama primer sobretono, el tercer armónico se llama segundo sobretono y así sucesivamente. No todos los tonos parciales en un tono

complejo son múltiplos enteros de la fundamental. A diferencia de los armónicos de los instrumentos de aliento de madera y los metales, los instrumentos de cuerda, como los pianos, producen tonos parciales "estirados" que son casi, aunque no del todo, armónicos. Éste es un factor importante en la afinación de pianos, y ocurre porque la rigidez de las cuerdas agrega un poco de fuerza restauradora a la tensión.

F I G U R A 2 1 . 7

Vibración compuesta del modo funda-

mental y el tercer armónico.

de clarinete de la misma altura tienen diferentes cualidades que el oído puede Do de piano

reconocer porque sus parciales son distintos. Tonos de la misma altura con distintas cualidades tienen o diferentes parciales o una diferencia en las intensida-Do de clarinete

des relativas de los parciales.

F I G U R A 2 1 . 8

Los sonidos del piano y el clarinete

difieren en calidad.

P U N T O D E C O N T R O L

La altura y la sonoridad de las voces de dos personas pueden ser iguales, pero las distingues con facilidad. ¿Por qué?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

La voz de cada persona tiene una mezcla característica de tonos parciales. Se dice que la voz de cada quien tiene su propio timbre, su propio "color" especial.

***21.5** Instrumentos musicales*

Los instrumentos musicales convencionales pueden agruparse en tres clases: aquellos en los cuales el sonido se produce mediante cuerdas en vibración, aquellos en los que el sonido se produce mediante la vibración de columnas de aire, y aquellos donde el sonido se produce mediante percusión, como con la vibración de una superficie bidimensional.

En un instrumento de cuerdas, la vibración de las cuerdas se transfiere a una caja de resonancia y luego al aire, pero con baja eficiencia. Para compensar esto, las orquestas tienen secciones de cuerdas relativamente grandes. Un menor número de los instrumentos de aliento de alta eficiencia compensan suficientemente un número mucho mayor de violines.

En un instrumento de aliento, el sonido es una vibración de una columna de aire en el instrumento. Hay varias formas de poner a vibrar columnas de aire. En los instrumentos de metal, como las trompetas, cornos franceses y trombones, el aire se sopla en la boquilla del instrumento en o cerca de un extremo del tubo y sale en el otro extremo. Las vibraciones de los labios del intérprete interactúan con las ondas estacionarias que se establecen por la energía acústica reflejada

en el interior del instrumento por el extremo acam-

panado del instrumento. El sonido proveniente de

F I G U R A 2 1 . 9

los instrumentos de aliento depende sobre todo del

Cada vez que Bay Johnson golpea una

tamaño y la forma del tubo por donde el aire se

tecla del piano, golpea una cuerda en el

mueve. Para manipular la longitud de la columna

piano. Las cuerdas de piano para notas

de aire en vibración, se empujan válvulas que agre-

bajas son más pesadas, tienen más iner-

gan o restan segmentos adicionales4 o se extiende

cia y vibran a una frecuencia más baja,

una altura más baja que las cuerdas más

la longitud del tubo, como en un trombón. En los

ligeras con la misma tensión de cuerda.

instrumentos de madera, como clarinetes, oboes y

La sonoridad tiene que ver con cuán

saxofones, un chorro de aire producido por el mú-

duro se golpean las teclas, lo que afecta

sico pone a vibrar una lengüeta, mientras que en pí-

las amplitudes de las cuerdas en vibra-

fanos, flautas y flautines, el músico sopla aire con-

ción. La sensibilidad táctil del piano lo

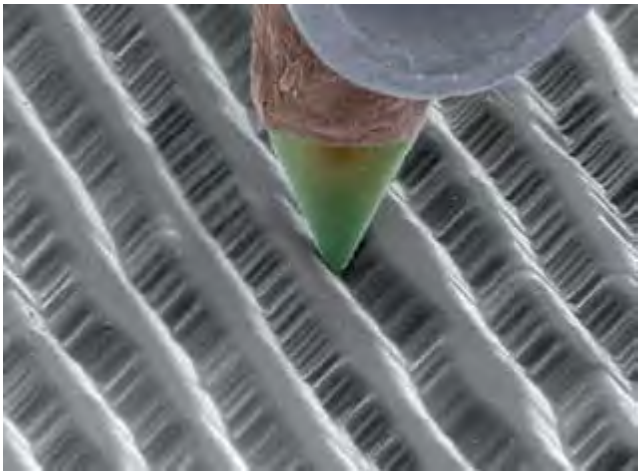
tra el borde de un orificio para producir un chorro

distingue de los primeros instrumentos

en vibración que pone a vibrar la columna de aire.

con teclado, como el clavecín.

4Un clarín no tiene ni válvulas ni longitud variable. Un músico que toca este instrumento debe ser experto en la creación de varios sobretonos para obtener diferentes notas.



En los instrumentos de percusión, como tambores y címbalos, una membrana bidimensional o superficie elástica se golpea para producir sonido. El tono fundamental producido depende de la geometría, la elasticidad y, en algunos casos, la tensión de la superficie. Los cambios de altura resultan de cambiar la tensión de la superficie en vibración; sumir con la mano el borde de la membrana de un tambor es una forma de lograr esto. Pueden establecerse varios modos de vibración si se golpea la superficie en diferentes lugares. En los timbales, por ejemplo, la forma de la caldera cambia la frecuencia del tambor. Como en todos los sonidos musicales, la calidad depende del número y la sonoridad relativa de los tonos parciales.

Los instrumentos musicales electrónicos difieren mucho de los instrumentos musicales convencionales. En lugar de cuerdas que deban tocarse con un arco, pulsarse o golpearse, o lengüetas sobre las cuales deba soplarse aire, o diafragmas que deban golpearse para producir sonidos, algunos instrumentos musicales usan electrones para generar las señales que producen los sonidos musicales. Otros inician con un sonido proveniente de un instrumento acústico y luego lo modifican. La música electrónica demanda del compositor y el intérprete una experiencia que rebasa el conocimiento de musicología. Esto pone una nueva y poderosa herramienta en manos del músico.

P U N T O D E C O N T R O L

El sonido de una guitarra proviene de cuerdas en vibración. ¿Qué es lo que vibra para producir el sonido en un clarín? ¿En un clarinete?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

En los instrumentos de aliento metálicos, como los clarines, las trompetas y los trombones, los labios del intérprete vibran uno contra otro y contra el borde de la boquilla. En los instrumentos de aliento de madera, como clarinetes, saxofones y oboes, el sonido se produce mediante lengüetas en vibración.

***21.6** Análisis de Fourier*

¿Alguna vez observaste de cerca los surcos de un antiguo disco de fonógrafo, del tipo en el que la abuela y el abuelo escuchaban música? Las variaciones en el ancho de los surcos, que se ven en la Figura 21.11, hacen que la aguja del fonógrafo vibre conforme viaja en el surco en movimiento. Dichas vibraciones mecánicas, a su vez, se transforman en vibraciones eléctricas que producen sonido. ¿No es notable que todas las distintas vibraciones producidas por los diversos instrumentos de una orquesta se capturen y luego se conviertan en una sola señal sonora?

F I G U R A 2 1 . 1 0

Los discos fonográficos no han desapa-

recido del todo, ya que los disc jockeys

producen mezclas dinámicas de sonido.

F I G U R A 2 1 . 1 1

Vista microscópica de los surcos en un disco fonográfico.

El sonido de un oboe desplegado en la pantalla de un osciloscopio se parece a la Figura 21.12a. Esta onda corresponde a las vibraciones en el oboe. También corresponde a la señal amplificada que activa la bocina del sistema de sonido y a la amplitud del Los pericos, como los seres huma-aire que vibra contra el tímpano. La Figura 21.12b muestra el aspecto de la onda de un nos, usan sus lenguas para crear y

clarinete. Cuando el oboe y el clarinete suenan en conjunto, el principio de superposi-formar sonidos. Pequeños cambios

en la posición de la lengua del

ción es evidente pues cada una de sus ondas se combinan para producir la onda que se perico propician diferencias gran-muestra en la Figura 21.12c.

des en el sonido que se produce

primero en la siringe del perico,

un órgano vocal anidado entre la

tráquea y los pulmones.

(a)

Oboe

(b)

Clarinete

F I G U R A 2 1 . 1 2

Formas de onda de (a) un oboe, (b) un

(c)

clarinete y (c) el oboe y el clarinete que

suenan en conjunto.

Oboe y clarinete en conjunto

La forma de la onda de la Figura 21.12c es el resultado neto de las formas a y b superpuestas (en interferencia). Si conoces a y b, es sencillo crear c. Pero un problema muy distinto es discernir en c las formas de a y b que la constituyen. Al observar sólo la forma c, no es posible descifrar el oboe del clarinete. Pero si escuchas una grabación de la música, tus oídos distinguirán a la vez qué instrumentos se tocan, cuáles notas tocan y cuál es su sonoridad relativa. Tus oídos descomponen en forma automática la ***F I G U R A 2 1 . 1 3***

señal total en sus partes componentes.

Una onda sinusoidal.

Como se mencionó al comienzo de este capítulo, el matemático francés Jean Baptiste Joseph Fourier descubrió una regularidad matemática en las partes componentes del movimiento ondulatorio periódico. Descubrió que incluso el movimiento ondulatorio periódico más complejo puede desensamblarse en ondas sinusoidales simples que se suman. Recuerda que una onda sinusoidal es la más simple de las ondas, que tiene una sola frecuencia (Figura 21.13). Fourier descubrió que todas las ondas periódicas pueden descomponerse en ondas sinusoidales constituyentes de diferentes amplitudes y frecuencias. La operación matemática para realizar esto se llama ***análisis de Fourier****. Aquí no se explicarán las matemáticas, sino sólo se apuntará que, con tal análisis, uno puede encontrar las ondas sinusoidales puras que se suman para componer el tono de, por decir, un violín. Cuando dichos tonos puros suenan juntos, como cuando se golpean algunos diapasones o se seleccionan las teclas adecuadas en un órgano eléctrico, se combinan para dar el tono del violín. La onda sinusoidal con*

frecuencia más baja es la fundamental y determina la altura de la nota. Las ondas sinusoidales con frecuencia más alta son los tonos parciales que brindan la calidad característica. Por ende, la onda de cualquier sonido musical no es más que una suma de ondas sinusoidales simples.

Puesto que la onda de la música es una multitud de varias ondas sinusoidales, para duplicar con exactitud el sonido por cualquiera de los medios con los que se graba el sonido, debes procesar un intervalo de frecuencias lo más grande posible. Las notas del teclado de un piano varían de 27 Hz a 4,200 Hz, pero, para duplicar con exactitud la música de una composición de piano, el sistema de sonido debe tener un intervalo

de frecuencias de hasta 20,000 Hz. Cuanto mayor sea el intervalo de las frecuencias de un sistema de sonido eléctrico, más se aproximará la salida musical al sonido original, de ahí el amplio intervalo de frecuencias en los mejores sistemas de sonido.

Tu oído realiza una especie de análisis de Fourier en forma automática. Ordena la compleja confusión de pulsaciones de aire que llegan a él y las transforma en tonos puros compuestos de ondas sinusoidales. Cuando escuchas, recombinas varios agrupamientos de dichos tonos puros. Lo que escuchas cuando acudes a un concierto depende de las combinaciones de tonos en las que aprendiste a centrar tu atención.

Puedes dirigir tu atención a los sonidos de los diversos instrumentos y discernir los tonos más débiles de los más fuertes; puedes deleitarte con la intrincada interacción de los instrumentos y aun así detectar los extraños ruidos de los demás a tu alrededor. ***F I G U R A 2 1 .1 4***

¿Cada persona escucha la misma

Ésta es una proeza increíble.

música?

21.7 *De analógico a digital*

Cuando escuchas a alguien decir cuán emocionante debió de ser vivir en una época donde se pasó de la luz de gas a la electricidad, o del caballo y la carreta a los automóvi-

¿Quién aprecia mejor la música:

les, puedes decirle que también vives en una época muy emocionante; quizás aún más un conocedor o un escucha

emocionante. Vives en una era digital, cuando los cambios son del almacenamiento y casual?

la transmisión de información analógica a lo digital. Aquellos cartuchos de 8 pistas, casetes, VHS y discos analógicos, rápidamente se están volviendo obsoletos.

Los reproductores fonográficos de antaño utilizaban una aguja convencional que vibraba en los surcos garabateados de un disco de más del doble de diámetro de los CD

y los DVD de hoy en día. La salida de una grabación fonográfica era una señal del tipo que se muestra en la Figura 21.12. Este tipo de onda continua se llama señal analógica.

La señal analógica puede convertirse en una señal digital si se mide el valor numérico de su amplitud muchas veces por segundo (Figura 21.15). Este

valor numérico se expresa en el sistema numérico que es conveniente para las computadoras, llamado binario.

En el código binario, cualquier número puede expresarse como una sucesión de 1 y 0; por ejemplo, el número 1 es 1, 2 es 10, 3 es 11, 4 es 100, 5 es 101, 17 es 10001 y así sucesivamente. De modo que la forma de la onda analógica se expresa como una serie de pulsos de "encendido" y "apagado" que corresponde a una serie de 1 y 0 en código binario.

F I G U R A 2 1 . 1 5

Las amplitudes

Señal analógica

La amplitud de la onda analógica se

proporcionan

mide en fracciones de segundo sucesivas

señal digital

para proporcionar información digital

que se registra en forma binaria sobre la

t

superficie reflejante del CD.

1 t 2 t 3

Tiempo

Depresiones microscópicas (pits), de aproximadamente un treceavo del diámetro de un cabello humano, se incrustan en el CD o DVD (Figura 21.16). Los pits son de dos tipos, cortos y largos, donde los cortos corresponden al 0 y los largos al 1. Un haz láser lee dichos pits. Cuando el haz cae en un pit corto sobre la superficie, se refleja hacia el ***F I G U R A 2 1 . 1 6***

Vista microscópica de los pits (depre-

siones) de un disco láser.

F I G U R A 2 1 . 1 7

Pits

Un haz láser enfocado en forma correcta

(depresiones)

lee información digital representada por

una serie de pits sobre el disco láser.

Disco

Recubrimiento plástico protector

Lentes

Láser

Espejo

Espejo semitransparente

Detector

sistema óptico del reproductor y registra un 0. Cuando el haz incide sobre un pit más largo que pasa, el sensor óptico registra un 1. En consecuencia, el haz lee los dígitos 1

y 0 del código binario.

En un CD, la tasa a la que dichos pequeños pits se muestrean es 44,100 veces por segundo. Si pudieras juntar 44,100 pits sin traslaparlos, serían del tamaño del punto al final de esta oración. Miles de millones de bits de información se codifican en la superficie reflectora, que está cubierta con una capa protectora de laca transparente.

Un DVD de una sola capa tiene aproximadamente seis veces la capacidad de transporte de información o de almacenamiento de información de un CD: 4.37 miles de millones de bytes (GB) frente a 700 millones de bytes (MB). (Cada byte corresponde a ocho bits.) Un DVD tiene pits más pequeños y una pista espiral más del doble de larga El almacenamiento de datos

cambia en forma continua, de los

que la de un CD. Los pits más pequeños del DVD se leen con una luz láser con longitud discos de vinil y las cintas analógi-de onda más corta y también mediante un lente de enfoque más poderoso. Mientras que cas de ayer, a los CD, DVD, Blu-ray,

los pits de un CD se encuentran en una sola superficie reflectora, algunos DVD tienen memorias flash y tarjetas SD digi-múltiples capas, y almacenan incluso más información en un disco. Con el enfoque tales, a la "nube". Espera a que

preciso, la luz láser lee los pits de la capa deseada.

éstos también se vuelvan objetos

de museo a medida que ocupen su

Ahora existe el reproductor DVD Blu-rayTM de 25 GB. Usa luz azul con una longi-lugar nuevas formas.

tud de onda más corta para leer más pits almacenados en un disco. Más información significa mayor resolución, de modo que la mayor capacidad de almacenamiento es la que permite las imágenes increíblemente claras que ofrecen los DVD Blu-rayTM de alta definición.

Pronto incluso los DVD y los discos Blu-rayTM se unirán a los discos fonográficos y las cintas VHS como objetos de museo, a medida que la información en el nuevo mundo digital se disperse mediante el gigabyte y el terabyte a través de Internet y las ondas de radio.

R E S U M E N D E T É R M I N O S *(C O N O C I M I E N T O)*
Altura. *Qué tan agudo o qué tan grave es un tono, como en*

Tono parcial. *Onda sonora de una sola frecuencia que forma*

una escala musical, que principalmente está regida por la

parte de un tono complejo. Cuando la frecuencia de un tono

frecuencia. Una fuente que vibra a una frecuencia alta pro-

parcial es un múltiplo entero de la frecuencia más baja, se le

duce un sonido de gran altura; una fuente que vibra a una

conoce como armónico.

frecuencia baja produce un sonido de poca altura.

Frecuencia fundamental. *La frecuencia de vibración más baja,*
Intensidad. *La potencia por metro cuadrado transportada por*

o primer armónico, en un tono musical.

una onda sonora; suele medirse en decibeles.

Armónico. *Tono parcial cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. El segundo armónico tiene*

Sonoridad. *La sensación fisiológica directamente relacionada*

el doble de frecuencia de la fundamental, el tercer armóni-

con la intensidad sonora o el volumen.

co tiene tres veces la frecuencia, y así en secuencia.

Calidad. *Sonido característico de un instrumento musical o*

Análisis de Fourier. *Método matemático que descompone*

voz, que se rige por el número y las intensidades relativas de

cualquier onda periódica en una combinación de ondas

los tonos parciales.

sinusoidales simples.

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S *(C O M P R E N S I Ó N)*
21.1 Ruido y música

12. Si la frecuencia fundamental de una nota es 200 Hz,

1. Distingue entre ruido y música.

¿cuál es la frecuencia del tercer armónico?

2. ¿Cuáles son las tres características principales de los tonos

13. ¿Qué determina la calidad musical de una nota?

musicales?

14. ¿Por qué las mismas notas pulsadas en un banjo y en una

guitarra tienen sonidos claramente diferentes?

21.2 Altura

3. ¿Cómo se relaciona con la frecuencia una nota musical alta?

21.5 Instrumentos musicales

4. ¿Cómo varía con la edad la altura más grande que uno

15. ¿Cuáles son las tres principales clases de instrumentos

puede escuchar?

musicales?

16. ¿Por qué, por lo general, las orquestas tienen un mayor

21.3 Intensidad del sonido y sonoridad

número de instrumentos de cuerda que de aliento?

5. ¿Qué mide un decibel?

6. ¿Cuántos decibeles corresponden al sonido con intensi-

21.6 Análisis de Fourier

dad más baja que puedes escuchar?

17. ¿Qué descubrió Fourier acerca de los patrones de ondas

7. ¿El sonido de 30 dB es 30 veces mayor que el umbral de

periódicas complejas?

audición o 103 (mil) veces mayor?

18. Un sistema de sonido de alta fidelidad puede tener un

8. Entre la intensidad sonora y la sonoridad, ¿cuál es más

intervalo de frecuencias que se extiende hasta 20,000 Hz o

subjetiva?

más. ¿Cuál es el propósito de la extensión de este intervalo?

9. ¿Cómo se comparan los sonidos más sonoros que uno

21.7 De analógico a digital

puede tolerar con los sonidos más débiles?

19. Distingue entre analógico y digital para la forma en que

21.4 Calidad

se captura la señal sonora en un disco fonográfico frente a

10. ¿Qué se entiende por frecuencia fundamental de una nota

un CD.

musical?

20. ¿Por qué el uso de luz azul permite más información en

11. Si la frecuencia fundamental de una nota es 200 Hz,

un DVD?

¿cuál es la frecuencia del segundo armónico?

P I E N S A Y R E A L I Z A *(A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 21. Consigue un reloj que haga tictac. Luego, para ver cuál*

23. En una hoja de papel gráfico, construye un ciclo comple-

oído tiene mejor audición, cúbrete un oído y descubre

to (un periodo de la frecuencia fundamental) de la onda

cuán lejos tu oído descubierto puede escuchar el tictac

compuesta de la Figura 21.6 al superponer varios despla-

del reloj; repite con el otro oído. Observa también cómo

zamientos verticales de la frecuencia fundamental y pri-

mejora la sensibilidad de tu audición cuando haces una

mero dos tonos parciales. Tu instructor puede mostrarte

concha con la mano sobre la oreja.

cómo hacerlo. Luego encuentra las ondas compuestas de

22. Emite el sonido con el tono más grave que puedas; luego

tonos parciales de tu elección.

duplica la altura para ver cuántas octavas puede abarcar

tu voz. Si eres cantante, ¿cuál es tu rango?

PIENSA Y RESUELVE *(APLICACIÓN MATEMÁTICA) 24. La frecuencia más alta que los seres humanos pueden*

28. ¿Cuánto más intenso es un sonido de 40 dB que un soni-

escuchar es de unos 20,000 Hz. ¿Cuál es la longitud de

do de 0 dB?

onda del sonido en aire a temperatura ambiente a esta fre-

29. ¿Cuánto más intenso es un sonido de 40 dB que un soni-

cuencia? ¿Cuál es la longitud de onda de los sonidos más

do de 30 dB?

bajos que pueden escuchar, aproximadamente 20 Hz?

30. Cierta nota tiene una frecuencia de 1,000 Hz. ¿Cuál es

25. Una cuerda de violín que toca la nota la oscila a 440 Hz.

la frecuencia de una nota una octava arriba de ella? ¿Dos

¿Cuál es el periodo de oscilación de la cuerda?

octavas arriba de ella? ¿Una octava abajo de ella? ¿Dos octa-

26. La cuerda de un cello que toca la nota do oscila a 264 Hz.

vas abajo de ella?

¿Cuál es el periodo de oscilación de la cuerda?

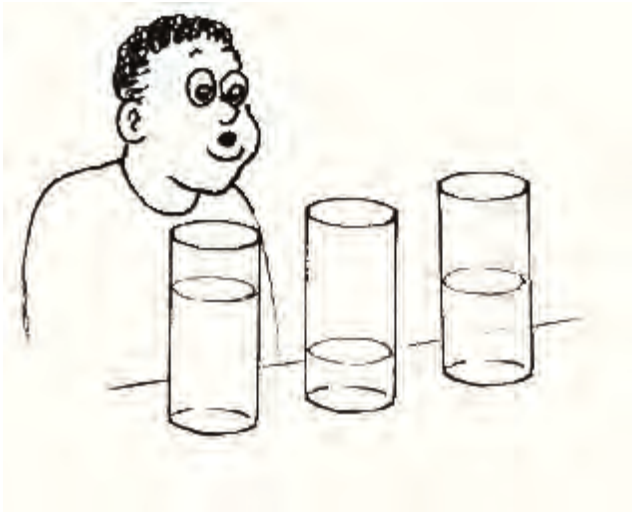
31. A partir de un tono fundamental, ¿cuántos armónicos hay

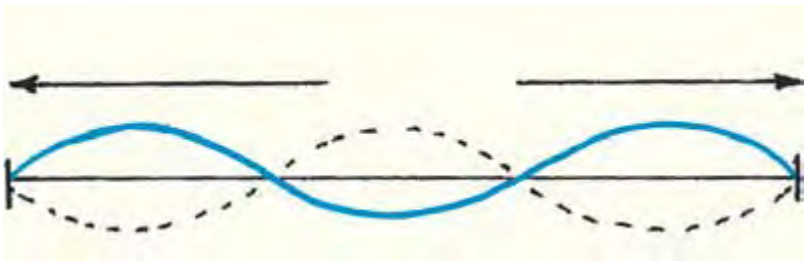
27. ¿Cuánto más intenso que el umbral de audición es un

entre la primera y segunda octavas? ¿Entre la segunda y la

sonido de 10 dB? ¿30 db? ¿60 dB?

tercera octavas? (Observa la Figura 21.5 para comenzar.)





PA R T E CUAT RO SO N I DO

P I E N S A Y C L A S I F I C A *(A N Á L I S I S)*

32. Considera tres notas: 220 Hz, 440 Hz y 660 Hz. Clasifí-

muestra. De mayor a menor, clasifica la altura del sonido

calas de mayor a menor para:

para cada una.

a. la altura.

b. la frecuencia.

c. la longitud de onda.

33. Soplas sobre las bocas de las botellas idénticas A, B y

C, cada una con diferente cantidad de agua, como se

C

A

B

***P I E N S A Y E X P L I C A** (S Í N T E S I S)*

34. Tu amigo dice que la frecuencia es una medida cuantita-

45. ¿Por qué los diapasones con brazos largos vibran a una

tiva de la altura. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo?

frecuencia más baja que los diapasones con brazos cortos?

35. Conforme aumenta la altura del sonido, ¿qué ocurre con

(Sugerencia: esta pregunta podría haberse planteado en el

la frecuencia?

Capítulo 8.)

36. Tu compañero de clase dice que el timbre se refiere a la

46. ¿Por qué el grosor de las cuerdas de bajos es mayor que el

calidad de un sonido musical estable compuesto de una

de las cuerdas de agudos?

mezcla de armónicos de diferentes intensidades. ¿Estás de

47. ¿Cuál vibrará a una frecuencia más alta: la cuerda más

acuerdo o en desacuerdo?

gruesa o la más delgada de dos cuerdas de guitarra de la

37. ¿Por qué las guitarras deben tocarse fuera del escenario

misma tensión y longitud?

antes de llevarse al escenario para un concierto? (Sugeren-

48. ¿Por qué la cuerda de guitarra en vibración no suena tan

cia: piensa en términos térmicos.)

fuerte cuando se monta en un banco de trabajo que cuan-

38. Si el sonido se vuelve más sonoro, ¿cuál característica de

do se monta en la guitarra?

la onda es probable que aumente: la frecuencia, la longi-

49. Si una guitarra no tuviera caja de resonancia, ¿una cuerda

tud de onda, la amplitud o la rapidez?

pulsada vibraría más tiempo o menos tiempo? ¿Por qué?

39. Explica cómo puedes bajar la altura de una nota en una

50. Si tocas muy ligeramente en el punto medio de una cuer-

guitarra al alterar (a) la longitud, (b) la tensión o (c) el

da de guitarra en vibración, puedes escuchar un tono que

grosor o masa de la cuerda.

está una octava arriba de la fundamental para dicha cuer-

40. ¿La altura de una nota depende de la frecuencia sonora, la

da. (Una octava es un factor de 2 en frecuencia.) Explica.

sonoridad, la calidad o de todo ello?

51. Si una cuerda de guitarra vibra en dos segmentos, ¿dónde

41. Cuando una cuerda de guitarra se pulsa, se produce una

puede sostenerse una pequeña hoja de papel doblado sin que

onda estacionaria que hace que la caja de resonancia osci-

salga volando? ¿Cuántas hojas de papel doblado podrían

le con una gran amplitud sostenida, que empuja de ida

sostenerse de igual modo si la onda tuviera tres segmentos?

y vuelta contra el aire circundante para generar sonido.

52. ¿Por qué las mismas notas en una trompeta y un saxofón

¿Cómo se compara la frecuencia del sonido resultante con

suenan diferente cuando ambas se tocan con la misma

la frecuencia de la onda estacionaria en la cuerda?

altura y sonoridad?

42. Las cuerdas de un arpa son de diferentes longitudes y

53. La amplitud de una onda transversal en una cuerda esti-

producen distintas notas. ¿Cómo se producen notas dife-

rada es el desplazamiento máximo de la cuerda desde su

rentes en una guitarra, donde todas las cuerdas tienen la

posición de equilibrio. ¿A qué corresponde la amplitud de

misma longitud?

una onda sonora longitudinal?

43. Si una cuerda en vibración se hace más corta (como

54. ¿Cuál de las dos notas musicales mostradas una a la vez

cuando pones un dedo sobre ella), ¿cómo afecta esto la

en la pantalla de un osciloscopio tiene la mayor altura?

frecuencia de vibración y la altura?

44. Una cuerda de nailon para guitarra vibra en un patrón de onda estacionaria, como se muestra en la figura. ¿Cuál es la longitud de onda de la onda?

90 cm

55. En los osciloscopios que se muestran en la pregunta anterior, ¿cuál pantalla muestra el sonido más intenso (si supones que se detectan con micrófonos similares)?

C A PÍ T U LO 21 R E V ISI Ó N

403

56. Para hacer música, Tom Senior sopla por los extremos de

62. El intervalo de frecuencias para un teléfono está entre

pajillas de distintas longitudes, con lo que pone a vibrar

500 Hz y 3,000 Hz. ¿Por qué un teléfono no transmite

pequeñas columnas de aire. ¿Cuáles pajillas, las cortas o

bien la música?

las largas, producen notas más graves? ¿Qué esperarías

63. ¿Cuántas octavas abarca la audición humana normal?

de la altura producida por el instrumento musical mucho

¿Cuántas octavas hay en el teclado de un piano común?

más grande que está detrás de Tom, el cual utiliza colum-

(Si no estás seguro, busca y observa.)

nas de aire resonante que se ponen a vibrar al golpear con

64. La nota do medio en un piano tiene una frecuencia

paletas los extremos de los tubos?

fundamental de unos 262 Hz. ¿Cuál es la frecuencia del

segundo armónico de esta nota?

65. Si la frecuencia fundamental de una cuerda de guitarra

es 220 Hz, ¿cuál es la frecuencia del segundo armónico?

¿Del tercer armónico?

66. Si la frecuencia fundamental de una cuerda de violín es

440 Hz, ¿cuál es la frecuencia del segundo armónico?

¿Del tercer armónico?

67. ¿Cuántos nodos, no incluidos los puntos extremos, hay

en una onda estacionaria que tiene tres longitudes de

onda de largo? ¿Cuántos nodos hay en una onda esta-

57. ¿Cuál es una medición más objetiva: la intensidad sonora

cionaria con un largo de cuatro longitudes de onda?

o la sonoridad? Defiende tu respuesta.

68. En un concierto al aire libre, la altura de los tonos musi-

58. Una persona tiene un umbral de audición de 5 dB,

cales no se modifica en un día ventoso. Explica.

y otra de 10 dB. ¿Cuál persona tiene la audición más

69. El oído humano en ocasiones se llama analizador de

desarrollada?

Fourier. ¿Qué significa esto y por qué no es una descrip-

59. ¿Cómo es que un órgano electrónico puede imitar los

ción adecuada?

sonidos de varios instrumentos musicales?

70. El ancho de un haz de láser fue y es significativo para leer

60. Después de inhalar gas helio, una persona habla con una

CD y DVD. Cuanto más delgado sea el haz, más juntas

voz muy aguda. Una de las razones para esto es la mayor

pueden estar las series de depresiones (pits). ¿Por qué la luz

rapidez del sonido en el helio que en el aire. ¿Por qué el

láser azul permitirá pits más cercanos que la luz láser roja?

sonido viaja más rápido en helio?

71. Elabora una pregunta de opción múltiple que distinga

61. ¿Por qué tu voz suena más plena en la ducha?

entre cualesquiera de los términos mencionados en el

Resumen de términos.

***P I E N S A Y D I S C U T E** (E V A L U A C I Ó N)*

72. La luz amarillo verdosa emitida por el alumbrado públi-

76. Una trompeta tiene llaves y válvulas que permiten al

co coincide con el color amarillo verdoso al que es más

trompetista cambiar la longitud de la columna de aire en
sensible el ojo humano. En consecuencia, un poste de
vibración y la posición de los nodos. Un clarín no tiene
alumbrado público de 100 W emite luz que se ve mejor
claves ni válvulas, aunque puede reproducir varias notas.
de noche. De igual modo, las intensidades sonoras moni-
Discute cómo la corneta logra diferentes notas.
torizadas de los anuncios comerciales de TV son más
77. ¿Todas las personas de un grupo escuchan la misma
sonoras que el sonido de la programación regular, aunque
música cuando escuchan con atención, como en la Figu-
no exceden las intensidades máximas reguladas. Discute
ra 21.14? ¿Todas ven la misma imagen cuando ven una
las frecuencias en las que los publicistas concentran el
pintura? ¿Todas saborean el mismo sabor cuando beben
sonido de los comerciales.
el mismo vino? ¿Todas perciben el mismo aroma cuando
73. Una guitarra y una flauta están afinadas entre sí. Dis-
huelen el mismo perfume? ¿Todas sienten la misma textu-
cute cómo un cambio de temperatura podría alterar esta
ra cuando tocan la misma tela? ¿Todas llegan a la misma
situación.
conclusión cuando escuchan una presentación lógica
74. Tu compañero de clase dice que una serie armónica de

de ideas?

frecuencias incluye la frecuencia fundamental y múltiplos

78. Discute por qué es adecuado decir que tendrás una pér-

enteros de la frecuencia fundamental. ¿Estás de acuerdo

dida auditiva mucho mayor en tu vejez que la experimen-

o en desacuerdo?

tada por tus abuelos.

75. ¿Cómo puedes afinar la nota A en un piano a su frecuen-

3

cia adecuada de 220 Hz con la ayuda de un diapasón cuya

frecuencia es 440 Hz? Discute.

P A R T E C U A T R O *Examen de práctica de opción múltiple Elige la MEJOR respuesta a cada una de las siguientes:*

16. El sonido viaja en el aire mediante una serie de

(a) compresiones.

1. Te balanceas de ida y vuelta en un columpio. Si en lugar de sen-

(b) rarefacciones.

tarte te pones de pie, el tiempo de un balanceo de ida y vuelta

(c) Ambas.

(a) se prolonga. (b) se acorta. (c) no cambia.

(d) Ninguna.

2. El tiempo que un péndulo tarda en balancearse de ida y vuelta

17. Las compresiones y rarefacciones en el sonido por lo general viajan se

conoce como

(a) en la misma dirección.

(a) frecuencia. (b) periodo. (c) longitud de onda. (d) amplitud.

(b) en direcciones opuestas.

3. El periodo de una onda de 10 Hz es

(c) en ángulos rectos mutuos.

(a) 1/10 s. (b) 1 s. (c) 10 s. (d) Ninguno de ellos.

(d) Ninguna de las anteriores.

4. Una onda transfiere

18. El sonido viaja en

(a) amplitud. (b) longitud de onda. (c) frecuencia. (d) energía.

(a) sólidos. (b) líquidos. (c) gases. (d) Todos los anteriores.

5. Para encontrar la rapidez de una onda multiplicas su frecuencia

19. La rapidez del sonido es un poco mayor en un

por su

(a) día frío. (c) día con temperatura estable.

(a) periodo. (c) amplitud.

(b) día caluroso. (d) Ninguno de los anteriores.

(b) longitud de onda. (d) Ninguno de éstos.

20. El sonido viajará más rápido en

6. Las vibraciones de una onda transversal se mueven en una dirección (a) una viga de acero.

(c) el agua del océano.

(a) a lo largo de la onda. (c) Ambas.

(b) un tablón de madera. (d) el aire en un globo.

(b) perpendicular a la onda. (d) Ninguna de éstas.

21. La sonoridad de un sonido guarda más relación con su

7. Las vibraciones de una onda longitudinal se mueven en una

(a) frecuencia. (b) periodo. (c) longitud de onda. (d) amplitud.

dirección

22. Tu amigo afirma que, bajo todas las condiciones, cualquier

(a) a lo largo y paralela a la onda. (c) Ambas.

onda de radio viaja más rápido que cualquier onda sonora. Tú

(b) perpendicular a la onda.

(d) Ninguna de éstas.

(a) estás de acuerdo con tu amigo.

8. La interferencia es característica de las

(b) no estás de acuerdo con tu amigo.

(a) ondas sonoras. (c) ondas en el agua.

23. Si golpeas un trozo de madera, ésta producirá un sonido carac-

(b) ondas luminosas. (d) Todas ellas.

terístico relacionado con su

9. Las ondas estacionarias son resultado de

(a) longitud de onda. (c) periodo.

(a) interferencia.

(b) amplitud. (d) frecuencia natural.

(b) ondas que se traslapan en fase y fuera de fase.

24. Cuando un objeto se pone a vibrar mediante una onda que

(c) ondas que se reflejan sobre ellas mismas.

tiene una frecuencia coincidente, lo que ocurre es

(d) Todas las anteriores.

(a) vibración forzada.

10. El efecto Doppler ocurre cuando una fuente de sonido se

(b) resonancia.

(a) acerca a ti.

(c) rarefacción.

(b) aleja de ti.

(d) reducción de amplitud.

(c) Ambos.

25. Los dispositivos que cancelan el ruido usan la

del sonido.

(d) Ninguno.

(a) destrucción. (c) resonancia.

11. Comparado con el sonido que escuchas de la sirena de un carro

(b) interferencia. (d) amplificación.

de bomberos estacionario, su sonido cuando se aproxima a ti

26. El fenómeno de los batimientos es resultado de la

tiene un aumento de

del sonido.

(a) rapidez. (c) Ambas.

(a) destrucción. (c) resonancia.

(b) frecuencia. (d) Ninguna.

(b) interferencia. (d) amplificación.

12. Las ondas de proa se producen por ondas de agua que

27. Un diapasón de 1,134 Hz suena al mismo tiempo cuando se

(a) se traslapan entre sí.

golpea una nota de piano. Escuchas tres batimientos por segun-

(b) interfieren constructivamente.

do. La frecuencia de la cuerda del piano es

(c) se mueven más lento que la fuente que las produce.

(a) 1,131 Hz. (b) 1,134 Hz. (c) 1,137 Hz.

(d) Todas las anteriores.

(d) Se necesita más información.

13. Las ondas de choque se producen por ondas de sonido que

28. La altura de un sonido se relaciona principalmente con su

(a) se traslapan entre sí.

(a) intensidad. (b) frecuencia. (c) amplitud. (d) rapidez.

(b) interfieren constructivamente.

29. Comparado con un sonido de 60 decibeles, un sonido de

(c) se mueven más lento que la fuente que las produce.

80 decibeles tiene una intensidad

(d) Todas las anteriores.

(a) 10 veces mayor.

14. Durante el tiempo que un avión produce un estampido sónico,

(b) 100 veces mayor.

la aeronave

(c) 1,000 veces mayor.

(a) rompe la barrera del sonido.

(d) más de 1,000 veces mayor.

(b) sale de una zambullida subsónica.

30. Comparado con un tono fundamental, la frecuencia de su

(c) vuela más rápido que el sonido.

segundo armónico es

(d) Todas las anteriores.

(a) la mitad.

15. Las ondas sonoras que la mayoría de los seres humanos no pue-

(b) el doble.

den escuchar son

(c) la misma.

(a) infrasónicas.

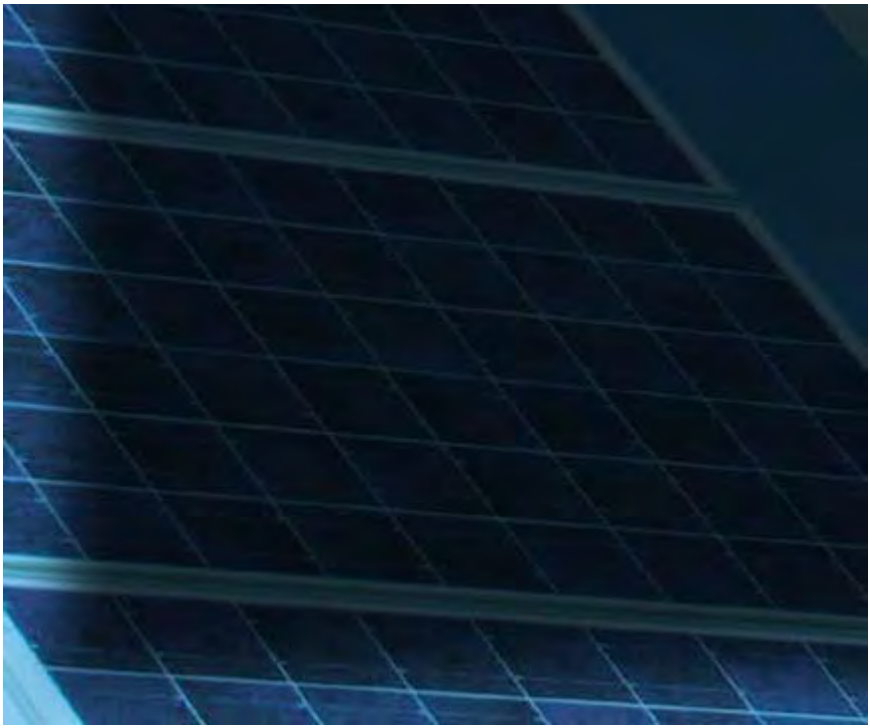
(d) cuatro veces más.

(b) ultrasónicas.

(c) Ambas.

Después de hacer elecciones razonadas, y discutirlas con tus amigos, (d) Ninguna.

encuentra las respuestas en la página S-1.



P A R T E C I N C O

Electricidad

y magnetismo

Cuán fascinante que este imán atraiga al mundo

entero cuando levanta estos clavos. Al tirón entre los

clavos y la Tierra lo llamo fuerza gravitacional, y al tirón

entre los clavos y el imán lo llamo fuerza magnética.

Puedo ponerle nombre a estas fuerzas, pero eso no

significa que las entiendo. Mi aprendizaje comienza

cuando me doy cuenta de que hay una gran diferencia

entre saber los nombres de las cosas y comprender realmente dichas cosas.

C A P Í T U L O 2 2

Electrostática

2

22.1 Electricidad

22.2 Cargas eléctricas

22.3 Conservación de la carga

22.4 Ley de Coulomb

3

22.5 Conductores y aislantes

22.6 Carga

22.7 Polarización de la carga

22.8 Campo eléctrico

22.9 Potencial eléctrico

4

1 *Jim Stith, ex presidente de la American Association of Physics Teachers (Asociación Estadounidense de Profesores de Física),*

demuestra un generador de Whimshurst que produce relámpagos

en miniatura. ***2*** *La naturaleza produce relámpagos más grandes y más refulgentes.* ***3*** *En el Bilkent Erzurum Laboratory School en Turquía, la profesora de física Z. Tugba Kahyaoglu coloca*

papel de aluminio en lo alto de un generador Van de Graaff.

4 *Sus estudiantes se sorprenden cuando trozos del papel vuelan súbitamente debido a la repulsión electrostática.*

Franklin propuso que la corriente eléctrica era un fluido

eléctrico bajo diferentes presiones. Fue el primero en califi-

Es razonable decir que, si Benjamín Franklin no hubie-

ra nacido, la Guerra de Independencia de Estados

Unidos habría terminado de un modo diferente. Esto

car dichas presiones como positiva y negativa, y fue el pri-

porque Franklin, además de sus aportaciones a la Declara-

mero en descubrir el principio de conservación de la carga.

ción de Independencia, persuadió a los franceses para que

La invención del pararrayos de Franklin comenzó con una

colocaran una flota de navíos cerca de la costa estadouni-

publicación en 1750. Propuso un experimento para pro-

dense e impedir así que los bar que el relámpago era electricidad, para lo cual voló británicos reforzaran al gene-una cometa durante una tormenta, en una etapa antes de

ral Cornwal is, a quien Geor-

que se convirtiera en una tormenta eléctrica. La leyenda

ge Washington venció en una

dice que con una cometa logró sacar chispas de una nube.

batal a decisiva de la guerra. Lo que no hizo fue volar su cometa en medio de una tor-La influencia de Franklin en menta eléctrica, lo que otros por desgracia hicieron y fue-Europa surgió del gran respe-

ron electrocutados. En vez de ello, la acumulación de carga

to que ganó como diplomático

eléctrica en la cuerda de la cometa de Franklin le demostró

y científico líder en Estados que los relámpagos eran eléctricos.

Unidos. A cualquier lugar que

Su pararrayos fue resultado de sus experimentos que

iba en Francia, se aglomeraban

demostraron que los metales con una punta aguda podían

multitudes que lo admiraban.

reunir o descargar electricidad silenciosamente, lo que

Franklin era un hombre de recursos. Sus logros como impedía la acumulación de carga en los edificios cuando impresor, editor, baladista, inventor, filósofo, político, sol-sobrevolaban nubes cargadas. En el techo de su casa insta-

dado, bombero, embajador, caricaturista y agitador anties-

ló barras de hierro, con puntas agudas, con un alambre que

clavista fueron todos parte de su compromiso con el servicio

corría de la base de las barras al suelo. Su hipótesis era

público. Una parte muy importante de su legado tiene que

que las barras extraerían "fuego eléctrico" silenciosamen-

ver con sus logros científicos.

te de las nubes antes de que golpearan como relámpago.

Si bien se le recuerda en general por su invención del Satisfecho de que los relámpagos podían evitarse, Franklin pararrayos, también inventó la armónica de vidrio, la estufa

alentó la instalación de pararrayos en la Academy of Phi-

Franklin, las gafas bifocales y el catéter urinario flexible.

ladelphia (más tarde la University of Pennsylvania) y en el

Nunca patentó sus inventos y en su autobiografía afirmó:

Congreso de Pennsylvania (más tarde el Salón de la Inde-

". .del mismo modo que disfrutamos los grandes benefi -

pendencia) en 1752.

cios de los inventos de otros, debemos agradecer la oportu-

En reconocimiento a sus logros con la electricidad,

nidad de servir a los demás con cualquier invento de nuestra

Franklin recibió la medal a Copley de la British Royal Socie-

creación; y esto debemos hacerlo de un modo libre y gene-

ty en 1753, y en 1756 se convirtió en uno de los pocos esta-

roso". A él se le recuerda en especial por sus investigaciones

dounidenses en ser elegido miembro de la Royal Society. Con

de la electricidad.

esta notoriedad estuvo en posición de influir en el resultado

En una época cuando la electricidad se considera-

de la venidera Guerra de Independencia de Estados Unidos.

ba como dos tipos de fluido, llamados vítreo y resinoso, Benjamín Franklin realmente reconfiguró el mundo.

***22.1** Electricidad*

***Electricidad** es el nombre que se da a una amplia diversidad de fenómenos eléctricos que, en una forma u otra, subyacen a casi todo lo que te rodea. Está en los relámpagos del En lugar de leer este capítulo*

cielo, en la chispa cuando enciendes un fósforo y es lo que mantiene unidos a los átomos en forma lenta y cuidadosa, intenta leerlo con rapidez, para luego

para formar moléculas. El control de la electricidad es evidente en dispositivos tecnoló-leerlo de nuevo con más cuidado.

gicos de muchos tipos, desde las lámparas hasta las computadoras. En este capítulo in-La física se aprende por repetición,

*vestigarás la electricidad en reposo, la electricidad estática, o simplemente **electrostática**.*

al repasar una y otra vez el mismo

La electrostática involucra cargas eléctricas, las fuerzas entre ellas, el aura que las material, pues cada vez tendrá más

rodea y su comportamiento en los materiales. En el Capítulo 23 investigarás el mo-sentido.

vimiento de las cargas eléctricas o corrientes eléctricas. También estudiarás los voltajes que producen las corrientes y cómo pueden controlarse. En el Capítulo 24 estudiarás la relación de las corrientes eléctricas con el magnetismo y, en el Capítulo 25, aprenderás cómo pueden controlarse el magnetismo y la electricidad para operar dispositivos eléctricos, y cómo la electricidad y el magnetismo se relacionan para convertirse en luz.

PA R T E C I N CO

EL EC T R I CI DA D Y M AG N E T I SM O

Para entender la electricidad es indispensable ir paso a paso, porque un concepto es el cimiento sobre el cual se basa el siguiente concepto. Así que, cuando estudies este material, pon atención extra. Puede ser difícil, confuso y frustrante si eres impaciente; pero, con esfuerzo cuidadoso, puede ser comprensible y gratificante. ¡Adelante!

Fuerzas eléctricas

SCREENCAST: Electricidad

¿Y si hubiera una fuerza universal que, como la gravedad, variara inversamente con el cuadrado de la distancia pero fuera miles de millones de millones de veces más intensa? Si existiera tal fuerza y si fuera una fuerza de atracción como la gravedad, el Universo se juntaría en una bola apretada, con toda la materia tan junta como fuera posible. Pero supón que esta fuerza fuese una fuerza de repulsión y cada pedazo de materia repeliera a todos los demás. ¿Entonces qué? Entonces el Universo explotaría y se separaría en poco tiempo. Sin embargo, supón que el Universo consistiera en dos tipos de partículas: por decir, positivas y negativas. Supón que las positivas repelieran a las positivas pero atrajeran a las negativas y que las negativas repelieran negativas pero atrajeran positivas. En otras palabras, tipos iguales se repelen y tipos diferentes se atraen. Supón que hubiera igual número de cada tipo de partículas, ¡de modo que esta intensa fuerza estuviera perfectamente equilibrada! ¿Cómo sería el Universo? La respuesta es sencilla: sería como éste en el que vives. Porque existen tales partículas y existe tal fuerza. Se le llama fuerza eléctrica.

F I G U R A 2 2 . 1

Cargas iguales se repelen. Cargas distin-

tas se atraen.

En el interior de cada trozo de materia hay átomos. ¿Y qué hay adentro de cada átomo? Las cargas positivas y las negativas se mantienen unidas por la enorme atracción de la fuerza eléctrica. Al formar grupos compactos y mezclados en forma equitativa de positivas y negativas, las enormes fuerzas eléctricas se han equilibrado casi a la perfección.

Cuando dos o más átomos se unen para formar una molécula, la molécula también contiene positivas y negativas en equilibrio. Y cuando billones de moléculas se combinan para formar un pedacito de materia, las fuerzas eléctricas se equilibran de nuevo.

Entre dos piezas de materia ordinaria difícilmente existe atracción o repulsión eléctrica porque cada pieza contiene igual número de positivas y negativas. Entre la Tierra y la Luna, por ejemplo, no hay fuerza eléctrica. La fuerza gravitacional mucho más débil, que sólo atrae, permanece como la fuerza predominante entre estos cuerpos.

***22.2** Cargas eléctricas*

Los términos positivo y negativo se refieren a la carga eléctrica, la cantidad fundamental que subyace a todos los fenómenos eléctricos. Las partículas con carga positiva en la materia ordinaria son los protones, y las partículas con carga negativa son los electrones.

El protón está incrustado en el núcleo de un átomo y no es móvil como el electrón más pequeño que puede deambular y hacer toda suerte de cosas útiles. Acompañando a los protones en el núcleo hay partículas neutras llamadas neutrones. Cuando dos átomos se acercan, el equilibrio entre las fuerzas de atracción y repulsión no es perfecto, porque los Cuáles cargas se llaman positivas

electrones se mueven dentro del volumen de cada átomo. Los átomos, entonces, pueden y cuáles se llaman negativas es el

atraerse entre sí y formar una molécula. De hecho, todas las fuerzas de enlace químico resultado de una elección hecha

que mantienen unidos a los átomos para formar moléculas son de naturaleza eléctrica.

por Benjamín Franklin. Pudo haber

Cualquier persona que piense estudiar química primero debe saber algo de la atracción sido del modo contrario.

y la repulsión eléctricas y, antes de estudiar fenómenos eléctricos, debe saber algo de los átomos. Recuerda del Capítulo 11 algunos hechos importantes acerca de los átomos:

C A PÍ T U LO 2 2 EL EC T ROS TÁT I C A

409

1. *Todo átomo está compuesto de un núcleo con carga positiva rodeado de electrones con carga negativa.*

2. *Los electrones de todos los átomos son idénticos. Cada uno tiene la misma cantidad de carga negativa y la misma masa.*

3. *Los protones y los neutrones componen el núcleo. (La forma común del átomo de hidrógeno, que no tiene neutrón, es la única excepción.) Los protones son aproximadamente 1,800 veces más masivos que los electrones, pero portan una cantidad de carga positiva igual a la carga negativa de los electrones. Los neutrones tienen un poco más masa que los protones y no tienen carga neta.*

4. *Por lo general, los átomos tienen tantos electrones como protones, de modo que el átomo tiene una carga neta igual a cero.*

¿Por qué los protones no jalan hacia el núcleo a los electrones con carga opuesta?

Puedes pensar que los electrones se comportan de la misma forma que los planetas que orbitan al Sol. Pero no es así; esta explicación planetaria no es válida para los electrones. Cuando se descubrió el núcleo en 1911, los

científicos sabían que los electrones no podían orbitar plácidamente alrededor del núcleo en la forma que la Tierra ***F I G U R A 2 2 . 2***

orbita al Sol. Sólo en aproximadamente una cien millonésima de segundo, de acuerdo Modelo de un átomo de helio. El núcleo con la física clásica, el electrón caería en espiral hacia el núcleo, y emitiría radiación atómico está compuesto de dos protones electromagnética al hacerlo. De modo que se necesitaba una nueva teoría, la teoría y dos neutrones. Los protones con llamada mecánica cuántica. Para describir el movimiento de los electrones, todavía se carga positiva atraen a dos electrones usa la terminología antigua, órbita y orbital, aunque la palabra preferida es capa, que negativos.

sugiere que los electrones están dispersos sobre una región esférica. En la actualidad, la explicación de la estabilidad del átomo tiene que ver con la naturaleza ondulatoria de los electrones. Un electrón actúa como una onda y necesita cierta cantidad de espacio en relación con su longitud de onda. Cuando se aborde la mecánica cuántica, en el Capítulo 32, verás que el tamaño atómico está determinado por la cantidad mínima de "espacio libre" que necesita un electrón.

¿Por qué los protones en el núcleo no se repelen entre sí y salen disparados? ¿Qué mantiene unido al núcleo? La respuesta es que, además de las fuerzas eléctricas en el núcleo, fuerzas nucleares no eléctricas incluso más intensas mantienen unidos a los protones y superan la repulsión eléctrica. En el Capítulo 33 aprenderás sobre las fuerzas nucleares y cómo los neutrones ponen una distancia necesaria entre los protones.

P U N T O D E C O N T R O L

1. Bajo las complejidades de los fenómenos eléctricos, se encuentra una regla fundamental de la que surgen casi todos los demás efectos. ¿Cuál es esta regla fundamental?

2. ¿Cómo difiere la carga de un electrón de la carga de un protón?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *Cargas iguales se repelen; cargas opuestas se atraen.*

2. *La carga de un electrón es igual en magnitud, pero opuesta en signo, a la carga de un protón.*

22.3 *Conservación de la carga*

Una regla básica de la física es que, siempre que algo está cargado, no se crea ni se La carga es como una estafeta en

destruye ningún electrón. Los electrones simplemente se transfieren de un material una carrera de relevos. Se puede

a otro. La carga se conserva. En todo evento, ya sea a gran escala o al nivel atómico y pasar de un objeto a otro pero no

nuclear, siempre se ha encontrado que aplica el principio de ***conservación de la carga****.*

se pierde.

Jamás se ha encontrado prueba de la creación o destrucción de carga eléctrica neta.

La conservación de la carga se clasifica, junto con la conservación de la energía y de la cantidad de movimiento, como un principio fundamental significativo en física.

En un átomo neutro hay tantos electrones como protones, de modo que no hay carga neta. El positivo equilibra de manera exacta al negativo. Si un electrón se retira de un átomo, entonces el átomo ya no es neutro. Entonces el átomo tiene una carga positiva más (protón) que carga negativa (electrón) y se dice que está cargado positivamente.1

Un átomo cargado se llama ion. Un ion positivo tiene una carga neta positiva. Un ion negativo, un átomo con uno o más electrones adicionales, está cargado negativamente.

De este modo se observa que un objeto que tenga distintos números de electrones y protones está cargado eléctricamente. Si tiene más electrones que protones, está cargado negativamente. Si tiene menos electrones que protones, está cargado positivamente.

Es interesante que cualquier objeto cargado eléctricamente tenga un exceso o una deficiencia de algún número entero de electrones, lo que significa que la carga del ***F I G U R A 2 2 . 3***

objeto es un múltiplo entero de la carga de un electrón. Los electrones no pueden di-Los electrones se transfieren de la piel

vidirse en fracciones de electrones. La carga es "granular", o constituida por unidades a la barra. Entonces la barra se carga

negativamente. ¿La piel está cargada?

elementales llamadas cuantos. Se dice que la carga está cuantizada, y el cuanto de carga

¿Cuánto, en comparación con la barra?

más pequeño es el del electrón (o protón). En toda la materia, jamás se han observado

¿Positiva o negativamente?

unidades de carga más pequeñas.2 Todos los objetos cargados a la fecha tienen una carga que es un múltiplo entero de la carga de un solo electrón o protón.

La electricidad estática es un pro-

blema en las bombas de gasolina.

P U N T O D E C O N T R O L

Incluso la más pequeña de las chis-

Si arrastras electrones hacia tus pies mientras caminas sobre una alfombra, *pas puede encender los vapores de*

¿estás cargado negativa o positivamente?

gasolina y causar incendios, con fre-

cuencia letales. Una buena regla de

seguridad es tocar metal y descargar

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

la carga estática de tu cuerpo antes

Tienes más electrones después de arrastrar los pies, de modo que estás cargado de servir el combustible. Además,

negativamente (y la alfombra está cargada positivamente).

no uses el teléfono celular cuando

sirvas combustible.

TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA Y CHISPAS

La carga eléctrica puede ser peligrosa. Hace 200 años había circuitos electrónicos pueden destruirse por las cargas estáticas.

niños pequeños llamados pajes de pólvora que corrían

Algunos componentes de los circuitos son tan sensibles que las

descalzos bajo las cubiertas de los buques de guerra para

chispas de electricidad estática pueden "freírlos". Los técnicos

llevar sacos de pólvora negra a los cañones de la parte superior. Era en electrónica con frecuencia usan ropa de telas especiales con

ley naval que esta tarea se realizara descalzo. ¿Por qué? Porque era

alambres de aterrizaje entre sus mangas y sus calcetines. Algunos

importante que no se acumulara carga estática en la pólvora sobre

usan brazaletes especiales que están conectados a una superficie

los cuerpos de los niños mientras corrían de un lado a otro. Los

aterrizada de modo que las cargas estáticas no se acumulen cuando

pies desnudos se arrastraban sobre las cubiertas mucho menos que

mueven una silla, por ejemplo. Cuanto más pequeño sea el circuito

los zapatos y garantizaban que la carga no se acumulara y pudiera

electrónico, más peligrosas serán las chispas que puede producir un

producir una chispa de ignición y una explosión.

cortocircuito en los elementos del circuito.

La carga estática es un peligro en muchas industrias en la

actualidad, no por las explosiones, sino porque los delicados

1Cada protón tiene una carga e 1, igual a 11.6 3 10219 coulomb. Cada electrón tiene una carga e 2, igual a 21.6 3 10219 coulomb. Por qué partículas tan diferentes tienen la misma magnitud de carga es una pregunta sin respuesta en la física. La igualdad de las magnitudes se ha analizado con una gran exactitud.

2Sin embargo, dentro del núcleo atómico, partículas elementales llamadas quarks portan cargas de 1/3 y 2/3 la magnitud de la carga del electrón. Cada protón y cada neutrón están constituidos de tres quarks. Dado que los quarks siempre existen en tales combinaciones y nunca se han encontrado separados, la regla del múltiplo entero de carga del electrón también se sostiene para los procesos nucleares.

22.4 *Ley de Coulomb*

La fuerza eléctrica, al igual que la fuerza gravitacional, disminuye inversamente como el cuadrado de la distancia entre los cuerpos cargados. Esta relación, descubierta por ***SCREENCAST: Ley de Coulomb***

Charles Coulomb en el siglo XVIII, se llama ***ley de Coulomb****. Afirma que, para dos objetos cargados que son mucho más pequeños que la distancia entre ellos, la fuerza entre los dos objetos varía directamente como el producto de sus cargas e inversamente como el cuadrado de la distancia de separación. (Repasa la ley del inverso al cuadrado en la Figura 9.5.) La fuerza actúa a lo largo de una línea recta de un objeto cargado al otro. La ley de Coulomb puede expresarse como:*

q q

1 2

F k 2

d

La ley de Coulomb es como la ley

de gravitación de Newton. Pero,

donde d es la distancia entre las partículas cargadas, q es la cantidad de carga de una a diferencia de la gravedad, las

1

partícula, q es la cantidad de carga de la otra partícula y k es la constante de pro por -

fuerzas eléctricas pueden ser de

2

cionalidad.

atracción o repulsión.

La unidad de carga del SI es el ***coulomb****, que se abrevia C. Resulta que 1 C es la unidad de carga asociada con 6.25 trillones de electrones. Esto puede parecer un número enorme de electrones, pero sólo representa la cantidad de carga que fluye en una bombilla común de 100 watts en poco más de un segundo.*

La constante de proporcionalidad k en la ley de Coulomb es similar a G en

la ley de gravitación de Newton. En lugar de ser un número muy pequeño como G

(6.67 3 10211), la constante de proporcionalidad eléctrica k es un número muy grande.

Es aproximadamente

9,000,000,000 Nm2/C2

o, en notación científica, k 5 9 3 109 Nm2/C2. La unidad Nm2/C2 no es central para la presente discusión; tan sólo convierte el lado derecho de la ecuación de la ley de Coulomb a la unidad de fuerza, el newton (N). Lo que importa es la gran magnitud de k. Si, por ejemplo, un par de partículas con cargas iguales de 1 C cada una estuvieran separadas 1 m, la fuerza de repulsión entre ellas sería de 9 mil millones de N.3 ¡Esto sería más de 10 veces el peso de un buque de guerra! Obviamente, tales cantidades de carga neta no existen en el entorno cotidiano.

Así que la ley de gravitación de Newton para masas es similar a la ley de Coulomb para cuerpos con carga eléctrica.4 La diferencia más importante entre las fuerzas gravitacional y eléctrica es que las fuerzas eléctricas pueden ser o de atracción o de repulsión, en tanto que las fuerzas gravitacionales sólo son de atracción. La ley de Coulomb subyace a las fuerzas de enlace entre las moléculas que son esenciales en el campo de la química.

P U N T O D E C O N T R O L

1. El protón que está en el núcleo del átomo de hidrógeno atrae al electrón que lo orbita. En relación con esta fuerza, ¿el electrón atrae al protón con menos fuerza, con más fuerza o con la misma cantidad de fuerza?

3Compara esto con la fuerza de atracción gravitacional entre dos masas de 1 kg separadas 1 m: 6.67 3 10211 N.

Ésta es una fuerza extremadamente pequeña. Para que la fuerza sea 1 N, ¡las masas separadas 1 m tendrían que ser casi de 123,000 kg cada una! Las fuerzas gravitacionales entre objetos ordinarios son excesivamente pequeñas, en tanto que las fuerzas eléctricas entre objetos ordinarios pueden ser demasiado enormes. Uno no las percibe porque, en general, positivos y negativos se equilibran. Incluso para objetos muy cargados, la razón de electrones a protones suele ser menor que una parte en un trillón de trillones.

4De acuerdo con la teoría cuántica, una fuerza que varía inversamente como el cuadrado de la distancia conlleva el intercambio de partículas sin masa. El intercambio de fotones sin masa es responsable de la fuerza eléctrica, y el intercambio de gravitones sin masa explica la fuerza gravitacional. Algunos científicos buscan una relación incluso más profunda entre la gravedad y la electricidad. Albert Einstein pasó la última parte de su vida buscando con poco éxito una "teoría de campo unificado". En fecha más reciente, la fuerza eléctrica se ha unificado con una de las dos fuerzas nucleares, la fuerza débil, que es importante en el decaimiento radiactivo.

2. Si un protón a una distancia particular de una partícula cargada se repele con una fuerza dada, ¿en cuánto disminuirá la fuerza cuando el protón esté tres veces más lejos de la partícula? ¿Cuando esté cinco veces más lejos?

3. ¿Cuál es el signo de la carga de la partícula en este caso?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. *La misma cantidad de fuerza, de acuerdo con la tercera ley de Newton, ¡mecánica básica! Recuerda que una fuerza es una interacción entre dos cosas; en este caso, entre el protón y el electrón. Ellos se jalan entre sí de la misma forma.*

2. *Disminuye a 1/9 de su valor original; a 1/25 su valor original.*

3. *Positivo.*

22.5 *Conductores y aislantes*

Es fácil establecer una corriente eléctrica en un metal porque uno o más de los electrones de la capa exterior de sus átomos no están anclados a los núcleos de átomos particulares, sino que tienen libertad de vagar en el material. A tal material se le llama buen ***conductor****. Cualquier metal es un buen conductor de corriente eléctrica por la misma razón que es un buen conductor del calor: los electrones en la capa atómica exterior de sus átomos están "sueltos". Los metales costosos como la plata, el oro y el platino están entre los mejores conductores, no se corroen y se utilizan comúnmente en cantidades pequeñas para productos de alto valor. El cobre y el aluminio suelen usarse en los sistemas de cableado eléctrico debido a su buen desempeño y costo más bajo.*

Los electrones en otros materiales (caucho y vidrio, por ejemplo) están estrechamente ligados y pertenecen a átomos particulares. No tienen libertad de vagar entre otros átomos del material. En consecuencia, no es fácil hacerlos fluir. Estos materiales son malos conductores de corriente eléctrica por la misma razón por la que generalmente son malos conductores del calor. A dicho material se le llama buen ***aislante****.*

El vidrio es un aislante muy bueno y se utiliza para mantener alejados los alambres eléctricos de las torres metálicas que los transportan. Muchos plásticos también son buenos aislantes, razón por la que el alambrado de tu casa está cubierto con una capa de plástico.

Todas las sustancias pueden clasificarse de acuerdo con su capacidad para conducir ***F I G U R A 2 2 . 4***

carga eléctrica. Los primeros de la lista serían los conductores y los últimos serían los Es más fácil establecer una corriente

aislantes. Los extremos de la lista están muy separados. La conductividad de un metal, eléctrica a través de cientos de kilómetros de alambre metálico que a través

por ejemplo, puede ser más de un trillón de veces mayor que la conductividad de un de unos pocos centímetros de material

aislante como el vidrio.

aislante.

Semiconductores

Algunos materiales, como el germanio (Ge) y el silicio (Si), no son ni buenos conductores ni buenos aislantes. Dichos materiales caen a la mitad del intervalo de resistividad El memristor (abreviatura para

eléctrica, al ser buenos aislantes en su forma cristalina pura y convertirse en excelentes resistor de memoria) utiliza una

conductores cuando incluso 1 átomo en 10 millones se sustituye con una impureza delgada película de óxido de

que agrega o retira un electrón de la estructura cristalina. Un material que se elabora titanio emparedado entre dos

para comportarse a veces como un aislante y a veces como un conductor se llama ***semi-capas de platino. En él caben chips***

conductor. Son delgadas capas de materiales semiconductores emparedadas juntas las de una forma 100 veces más densa

que constituyen a los transistores, que se usan para controlar el flujo de electrones en que en los transistores y recuerda

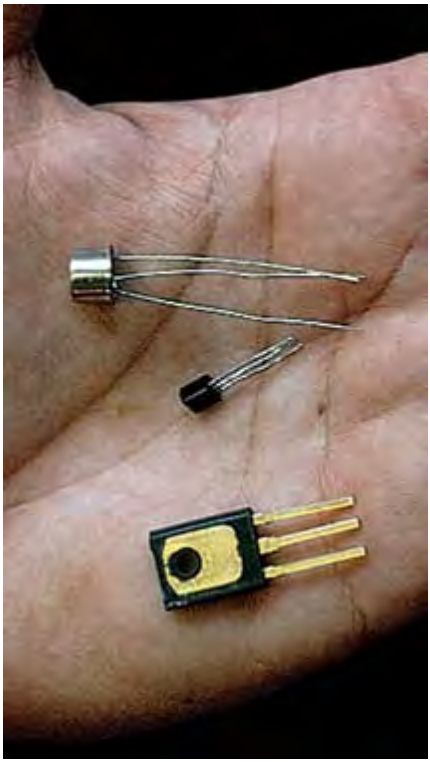
los circuitos, para detectar y amplificar señales de radio y para producir oscilaciones la información sin energía eléctrica.

¿Los memristores aparecerán pron-

en los transmisores; también actúan como interruptores digitales. Estos pequeños sóli-to en computadoras y dispositivos

dos fueron los primeros componentes eléctricos en los cuales materiales con diferentes inalámbricos?

características eléctricas no estaban interconectados con alambres sino que se unían



físicamente en una estructura. Necesitan muy poca potencia y duran en forma indefinida con el uso normal.

Un semiconductor también conducirá cuando sobre él brille una luz del color adecuado. Una placa de selenio puro por lo general es un buen aislante, y cualquier carga eléctrica acumulada sobre su superficie permanecerá durante largos periodos en la oscuridad. Sin

embargo, si la placa se expone a la luz, la carga fluye casi de inmediato.

Si una placa de selenio cargada se expone a un patrón de luz, como el patrón de luz y oscuridad que constituye esta página, la carga fluirá sólo de las áreas expuestas a la luz. Si un polvo plástico negro se cepillara sobre su superficie, el polvo se pegaría sólo a las áreas cargadas donde la placa no fue expuesta a la luz. Ahora, si una hoja de papel con una carga eléctrica en el reverso se pusiera sobre la placa, el polvo plástico negro se atraería hacia el papel y formaría el mismo patrón que, por decir, el de esta página.

Éstos son los principios básicos de las fotocopiadoras.

Superconductores

Un conductor ordinario tiene sólo una resistencia pequeña al flujo de carga eléctri-

(a)

ca. Un aislante tiene mucho mayor resistencia (el tema de la resistencia eléctrica se abordará en el Capítulo 23). Es sorprendente que en ciertos materiales a temperaturas suficientemente bajas desaparezca la resistencia eléctrica. Los materiales adquieren resistencia cero (conductividad infinita) al flujo de carga. Tal material se denomina superconductor. Una vez que se establece corriente eléctrica en un superconductor, los electrones fluyen de manera indefinida. Sin resistencia eléctrica, la corriente pasa por un superconductor sin perder energía; no ocurren pérdidas por calor cuando fluye carga. La superconductividad de los metales cerca del cero absoluto se descubrió en 1911. En 1987 se descubrió la superconductividad a una temperatura "alta" (arriba (b)

de 100 K) en un compuesto no metálico. La superconductividad ha progresado desde entonces, con aplicaciones que incluyen líneas de transmisión eléctrica de baja pérdi- F I G U R A 2 2 . 5

da y vehículos de levitación magnética de alta rapidez que se espera que sustituyan a (a) Tres transistores. (b) Muchos transis-los ferrocarriles tradicionales.

tores en un circuito integrado.

22.6 Carga

Para cargar las cosas se transfieren electrones de un lugar a otro. Esto se puede hacer mediante contacto físico, como ocurre cuando las sustancias se frotan una con otra o simplemente se tocan. O se puede redistribuir la carga sobre un objeto con sólo poner un objeto cargado cerca de él; a esto se llama inducción.

Carga mediante fricción y contacto

Todo mundo está familiarizado con los efectos eléctricos producidos por la fricción.

Puedes frotar la piel de un gato y escuchar el crepitar de las chispas que se producen, o peinar tu cabello limpio y seco enfrente de un espejo en una habitación oscura y ver y escuchar las chispas. Puedes arrastrar los zapatos por una alfombra y sentir un hormigueo a medida que las cargas fluyen cuando tocas la perilla de la puerta. Habla con algunos ancianos y te contarán del sorprendente choque que recibían cuando se deslizaban por el recubrimiento plástico del asiento cuando estaban en un automóvil estacionado (Figura 22.6). La carga se transfiere entre las ropas en una secadora. En todos estos casos, los electrones se transfieren por fricción cuando un material frota contra otro.

F I G U R A 2 2 . 6

Carga por fricción y luego por contacto.

Los electrones pueden transferirse de un material a otro por simple contacto. Por ejemplo, cuando una barra con carga negativa se pone en contacto con un objeto neutro, algunos electrones se moverán hacia el objeto neutro. Este método de cargar se llama simplemente carga por contacto. Si el objeto es un buen conductor, los electrones se dispersarán hacia todas partes de su superficie porque los electrones transferidos se repelen entre sí. Si es un mal conductor, puede ser necesario tocar la barra en varios lugares sobre el objeto para obtener una distribución de carga más o menos uniforme.

Carga por inducción

Si pones un objeto cargado cerca de una superficie conductora, los

electrones se mueven en el material de la superficie, incluso sin contacto físico. Considera las dos esferas metálicas aisladas, A y B, de la Figura 22.7. En la parte (a) las esferas se tocan entre sí, de modo que, en efecto, éstas forman un solo conductor descargado. En la parte (b), cuando una barra con carga negativa se acerca a A, los electrones en el metal, al tener libertad para moverse, se repelen lo más lejos posible hasta que su repulsión es tan grande que equilibra la influencia de la barra: la carga se redistribuye. En las partes (c) y (d), si las esferas están separadas mientras la barra todavía está presente, cada una tendrá carga igual y opuesta. Ésta es carga por inducción. La barra cargada nunca toca las esferas, y la barra conserva la misma carga que tenía en un inicio.

F I G U R A 2 2 . 7

Carga por inducción.

De igual modo puedes cargar una sola esfera por inducción si la tocas cuando diferentes partes de ella tienen distinta carga. Considera la esfera metálica que cuelga de un hilo no conductor, como se muestra en la Figura 22.8. Cuando tocas la superficie metálica con un dedo, proporcionas una ruta para que la carga fluya hacia o desde un depósito muy grande de carga eléctrica: la tierra.

Se dice que aterrizas (pones a tierra) la esfera, un proceso que puede dejarla con una carga neta. En el Capítulo 23 se regresará a esta idea de la puesta a tierra, cuando estudies las corrientes eléctricas.

Carga neta cero

Carga neta es

Carga neta es

(a)

(b)

(c)

(d)

Click!

(e)

(f)

F I G U R A 2 2 . 8

Etapas de inducción de carga por puesta a tierra. (a) La carga neta sobre la esfera metálica es cero.

(b) La redistribución de carga se induce sobre la esfera por la presencia de la barra cargada. La carga neta sobre la esfera todavía es cero. (c) Tocar el lado negativo de la esfera retira electrones por contacto. (d) Esto deja a la esfera con carga positiva. (e) La esfera se atrae con más fuerza hacia la barra negativa y, cuando la toca, ocurre la carga por contacto. (f) La esfera negativa se repele por la barra que todavía tiene algo de carga negativa.

C A PÍ T U LO 2 2 EL EC T ROS TÁT I C A

415

La carga por inducción ocurre durante las tormentas eléctricas. Los fondos de las nubes con carga negativa inducen una carga positiva sobre la superficie del suelo bajo ellas. Como se mencionó al comienzo de este capítulo, Benjamín Franklin fue el primero en demostrar esto cuando su famoso experimento del vuelo de cometa

comprobó que los relámpagos eran un fenómeno eléctrico.5 El relámpago es una descarga eléctrica entre una nube y el suelo con carga opuesta, o entre regiones de las nubes con cargas opuestas.

Franklin también descubrió que la carga fluye con facilidad hacia o desde puntas metálicas agudas y diseñó el primer pararrayos. El principal propósito del pararrayos es evitar un incendio provocado por un relámpago. Si, por alguna razón, no se drena suficiente carga del aire a la barra y el relámpago golpea de cualquier forma, éste puede atraerse hacia la barra y tomar una ruta directa hacia el suelo, lo que por tanto salva F I G U R A 2 2 . 9

al edificio.

La carga negativa en el fondo de la nube

induce una carga positiva en la superfi-

cie del suelo bajo ella.

F I G U R A 2 2 . 1 0

Los pararrayos se conectan mediante alambres de uso rudo, por lo que pueden conducirse a tierra corrientes muy grandes si pega el relámpago. Con mucha frecuencia, la carga se escapa por la punta afilada de la barra para evitar un relámpago.

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Las cargas inducidas en las esferas A y B de la Figura 22.7 tendrían que ser exactamente iguales y opuestas?

2. ¿Por qué la barra negativa de la Figura 22.7 tiene la misma carga antes y El relámpago ocurre principalmente

después de cargar las esferas, mas no cuando tiene lugar la carga, como en climas cálidos. A medida que el

en la Figura 22.8?

vapor de agua caliente se eleva

en el aire, éste roza los cristales de

hielo en el aire de la parte superior,

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

lo que produce una carga similar a

1. Sí, porque cada carga positiva sobre la esfera A resulta de un electrón tomado la que ocurre cuando frotas los pies

de A y movido a B. Esto es como retirar ladrillos de la superficie de un camino de sobre una alfombra. Los cristales

ladrillos y colocarlos todos en la acera. El número de ladrillos en la acera coin-de hielo obtienen una ligera carga

cide exactamente con el número de agujeros en el camino. Del mismo modo, positiva y la corriente ascendente

el número de electrones adicionales en B coincidirá de manera exacta con el los lleva hacia la parte superior

de la nube. De modo que la parte

número de "agujeros" (cargas positivas) que quedan en A. La carga positiva es superior de una nube por lo gene-resultado de un electrón ausente.

ral tiene carga positiva y la parte

2. En el proceso de carga de la Figura 22.7 y alguna de las esferas. Sin embargo, en inferior tiene carga negativa. El

la Figura 22.8, la barra tocó la esfera con carga positiva. Una transferencia de relámpago es el rayo que forma un

carga por contacto redujo la carga negativa de la barra.

arco entre estas regiones y entre la

nube y el suelo bajo ella.

5Benjamín Franklin inventó muchas cosas que mejoraron la calidad de vida. ¡Sin duda fue un hombre muy ocupado! Sólo una tarea tan importante como ayudar a formar el sistema de gobierno de Estados Unidos impidió que dedicara todavía más de su tiempo a su actividad favorita: la investigación científica de la naturaleza.

22.7 Polarización de la carga

La carga por inducción no se restringe a los conductores. Cuando una barra cargada La polarización eléctrica explica

lo "pegajoso" de las moléculas de

se acerca a un aislante, no hay electrones libres que puedan migrar por el material agua. Las cargas opuestas entre las

aislante. En vez de ello, se presenta un reordenamiento de cargas dentro de los átomos moléculas de agua se atraen, razón

y las moléculas (Figura 22.11). Aunque los átomos no se mueven de sus posiciones por la cual el agua en la atmósfera

relativamente fijas, sus "centros de carga" se mueven. Un lado del átomo o de la se condensa a una temperatura

molécula se induce a volverse más negativo (o positivo) que el lado opuesto. Se dice mucho más alta que los gases de

las moléculas no polarizadas, como

que el átomo o la molécula están eléctricamente polarizados. Si la barra cargada es el nitrógeno y el dióxido de carbo-negativa, por ejemplo, entonces la parte positiva del átomo o la molécula se jala en no, aun cuando ambas sean más

una dirección hacia la barra, y el lado negativo del átomo o la molécula se empuja pesadas y tengan un movimiento

en una dirección que se aleja de la barra. Las partes positiva y negativa de los átomos más lento que el H2O.

y las moléculas se alinean. Están eléctricamente polarizadas.

(a)

(b)

F I G U R A 2 2 . 1 1

Un electrón que se mueve en forma frenética alrededor del núcleo atómico produce una nube de electrones. (a) El centro de la nube

negativa por lo general coincide con el centro del núcleo positivo en un átomo. (b) Cuando una carga negativa externa se acerca por la derecha, como sobre un globo cargado, la nube de electrones se distorsiona de modo que los centros de carga negativa y positiva ya no coinciden. El átomo ahora está eléctricamente polarizado.

Puedes entender por qué los pedazos de papel eléctricamente neutros se atraen hacia un objeto cargado, por ejemplo, un peine que te pasas por el cabello. Cuando el peine cargado se acerca, las moléculas del papel se polarizan. El signo de la carga más cercana al peine es opuesta a la carga del peine. Las cargas del mismo signo están un poco más distantes. La cercanía gana (ley del inverso al cuadrado) y los pedazos de papel experimentan una atracción neta. En ocasiones se agarrarán del peine y luego F I G U R A 2 2 . 1 2

saldrán volando en forma súbita. Esta repulsión ocurre porque los pedazos de papel Todos los átomos o moléculas cerca de

adquieren el mismo signo de carga que el peine cargado cuando entran en contacto.

la superficie se vuelven eléctricamente

Frota un globo inflado en tu cabello y se cargará. Coloca el globo contra la pared y se polarizados. Cargas superficiales de

pegará. Esto se debe a que la carga sobre el globo induce una carga superficial opuesta igual magnitud y signo opuesto se

inducen sobre las superficies opuestas

sobre la pared. De nuevo, la cercanía gana, porque la carga sobre el globo está un poco del material.

más cerca de la carga inducida opuesta que de la carga del mismo signo (Figura 22.14).

F I G U R A 2 2 . 1 3

Un peine cargado atrae un pedazo

F

de papel no cargado porque la fuerza de

–

atracción para la carga más cercana es

F+

mayor que la fuerza de repulsión para la

carga más lejana.

C A PÍ T U LO 2 2 EL EC T ROS TÁT I C A

417

Muchas moléculas —H2O, por ejemplo— están eléctricamente polarizadas en sus estados normales. La distribución de carga eléctrica no está muy bien equilibrada.

Existe un poco más de carga negativa en un lado de la molécula que en el otro (Figura 22.15). Se dice que tales moléculas son dipolos eléctricos.

P U N T O D E C O N T R O L

1. Una barra con carga negativa se acerca a unos pequeños pedazos de F I G U R A 2 2 . 1 4

papel neutro. Los lados positivos de las moléculas en el papel son atraí-El globo con carga negativa polariza los

dos hacia la barra y los lados negativos de las moléculas se repelen. ¿Por átomos de la pared de madera y crea

qué no se cancelan estas fuerzas de atracción y repulsión?

una superficie con carga positiva, de

2. En un sentido humorístico, si frotas un globo en tu cabello y pones la modo que el globo se pega a la pared.

cabeza contra la pared, ¿se pegará a la pared como lo haría el globo?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. Los lados positivos tan sólo están más cerca de la barra. Por tanto, experimentan una mayor fuerza eléctrica que los lados negativos más alejados. En consecuencia, se dice que la cercanía gana. ¿Puedes ver que una barra positiva todavía produciría atracción?

2. Lo haría, si tuvieras la cabeza hueca; esto es: si la masa de tu cabeza fuera aproximadamente la del globo, de modo que la fuerza producida sería evidente.

F I G U R A 2 2 . 1 5

Una molécula de H O es un dipolo

2

eléctrico.

22.8 Campo eléctrico

Las fuerzas eléctricas, al igual que las fuerzas gravitacionales, actúan entre cosas que no están en contacto unas con otras. Tanto para la electricidad como para la gravedad existe un campo de fuerza que influye en los cuerpos cargados y masivos, respectivamente. Recuerda, del Capítulo 9, que las propiedades del espacio que rodea a cualquier cuerpo masivo se alteran de tal forma que otro cuerpo masivo introducido a esta región experimentará una fuerza. La fuerza es gravitacional, y el espacio alterado que rodea a un cuerpo masivo es su campo gravitacional. Puedes considerar que cualquier otro cuerpo masivo interactúa con el campo y no directamente con el cuerpo masivo que Los tiburones y algunas especies

lo produce. Por ejemplo, cuando una manzana cae de un árbol, se

dice que interactúa relacionadas de peces están equipados con receptores especializa-

con la Tierra, pero también puedes pensar que la manzana interactúa con el campo dos en sus hocicos que perciben

gravitacional de la Tierra. El campo desempeña una función de intermediario en la campos eléctricos muy débiles

fuerza entre los cuerpos. A menudo se cree que los cohetes distantes y objetos parecidos generados por otras criaturas en el

interactúan con los campos gravitacionales en lugar de con las masas de la Tierra y agua de mar.

otros cuerpos responsables de los campos. Así como el espacio alrededor de un planeta (y alrededor de cualquier otro cuerpo masivo) está lleno con un campo gravitacional, el espacio alrededor de todo cuerpo cargado eléctricamente está lleno con un campo eléctrico, un aura energética que se extiende por el espacio.

Satélite

Electrón

F I G U R A 2 2 . 1 6

(a) Una fuerza gravitacional mantiene al satélite en órbita alrededor del Planeta

Protón

planeta y (b) una fuerza eléctrica mantiene al electrón en órbita alrededor del protón. En ambos casos, no hay contacto entre los cuerpos. Se dice que los cuerpos en órbita interactúan con los campos de fuerza del planeta y el protón y en todas partes están en contacto con dichos campos. Por ende, la fuerza que un cuerpo con carga eléctrica ejerce sobre otro puede describir-

(a)

(b)

se como la interacción entre un cuerpo y el campo establecido por el otro.

Un campo eléctrico tiene tanto magnitud (intensidad) como dirección. La magnitud del campo en cualquier punto es simplemente la fuerza por unidad de carga. Si un cuerpo con carga q experimenta una fuerza F en algún punto del espacio, entonces el campo eléctrico E en dicho punto es:

$$E = \frac{F}{q}$$

El campo eléctrico se representa con flechas de vectores en la Figura 22.17a. La dirección del campo se muestra mediante los vectores y se define como la dirección en la cual se empujaría a una pequeña carga de prueba positiva en reposo.6 La dirección de la fuerza y la del campo en cualquier punto son iguales. Por tanto, en la figura se observa que todos los vectores apuntan hacia el centro de la esfera con carga negativa.

SCREENCAST: Campos eléctricos

Si la esfera tuviera carga positiva, los vectores apuntarían hacia el otro lado de su centro porque se repelería una carga de prueba positiva en la vecindad.

(a)

(b)

F I G U R A 2 2 . 1 7

Representaciones del campo eléctrico en torno a una carga negativa: (a) una representación vectorial y (b) una representación con líneas de fuerza.

HORNO DE MICROONDAS

Imagina un encierro de bolas de ping-pong entre algunas metálico refleja las microondas por todo el horno para una rápida raquetas, todas en reposo. Ahora imagina que las raquetas

cocción.

súbitamente comienzan a aletear de ida y vuelta como hélices

El papel seco, los platos de espuma de estireno u otros materiales

semigiratorias, y que golpean las bolas de ping-pong vecinas. Las recomendados para usar en los hornos de microondas no contienen

bolas se energizan y se mueven en todas direcciones. Un horno

agua ni ninguna otra molécula polar, de modo que las microondas

de microondas funciona de manera similar. Las raquetas son

pasan a través de ellos sin ningún efecto. Lo mismo ocurre con

moléculas de agua (u otras moléculas polares) que se ponen a

el hielo, en el que las moléculas de H2O están bloqueadas en su

aletear de ida y vuelta al ritmo de las microondas oscilantes en

posición y no pueden girar. Los materiales metálicos reflejan las

el encierro. Las bolas de ping-pong son moléculas no polares que microondas, razón por la cual los utensilios metálicos no funcionan

constituyen el volumen del alimento que se va a cocinar.

bien en un horno de microondas.

Cada molécula de H

Cuando quieras hervir agua en un horno de microondas debes

2O es un dipolo eléctrico que se alinea con

un campo eléctrico justo como la aguja de una brújula se alinea

tener cuidado. En ocasiones el agua puede calentarse más rápido

con un campo magnético. Cuando el campo eléctrico oscila, las

de lo que pueden formarse burbujas, y entonces el agua se calienta

moléculas de H

por encima del punto de ebullición: se supercalienta. Si el agua

2O también oscilan. Las moléculas de H2O se

mueven de manera muy activa cuando la frecuencia de oscilación

se sacude o agita lo suficiente como para que se formen burbujas

coincide con su frecuencia natural: en resonancia. El alimento

con rapidez, éstas expulsarán violentamente el agua caliente de

se cocina por una especie de "fricción cinética" a medida que las

su contenedor. A más de una persona le ha explotado agua en

moléculas de H

ebullición en la cara.

2O oscilantes (u otras moléculas polares) imparten

movimiento térmico a las moléculas de su alrededor. El envase

6La carga de prueba es pequeña, de modo que no influye mucho en las fuentes del campo que se va a medir.

Recuerda, de tu estudio del calor, la misma necesidad de un termómetro de masa pequeña cuando mides la temperatura de cuerpos con masas más grandes.

(a)

(b)

(c)

F I G U R A 2 2 . 1 8

Algunas configuraciones del campo eléctrico. (a) Líneas de fuerza que emanan de una sola partícula con carga positiva. (b) Líneas de fuerza para un par de partículas con igual carga pero opuesta. Observa que las líneas emanan de la partícula positiva y terminan en la partícula negativa. (c) Líneas de fuerza uniformes entre dos placas paralelas con carga opuesta.

Una manera más clara de describir un campo eléctrico es con líneas de fuerza (líneas de campo), como se muestra en la Figura 22.17b. Las líneas de fuerza que se muestran en la figura representan un pequeño número de la cantidad infinitamente grande de posibles líneas que indican la dirección del campo. La figura es una representación bidimensional de tres dimensiones. Donde las líneas están más alejadas, el campo es más débil. Para una carga aislada, las líneas se extienden hasta el infinito; para dos o más cargas opuestas, las líneas se representan como emanaciones que salen de una carga positiva y terminan en la carga negativa. En la Figura 22.18 se muestran algunas configuraciones de campo eléctrico.

El concepto de campo eléctrico ayuda a comprender no sólo las fuerzas entre cuerpos cargados aislados y estacionarios, sino también lo que ocurre cuando se mueven las cargas. Cuando las cargas se mueven, su movimiento se comunica a los cuerpos Una barra de dulce en el bolsillo de

cargados vecinos en forma de una perturbación del campo. Tal perturbación emana Percy Spencer se fundió misteriosa-a la velocidad de la luz de un cuerpo cargado y acelerado. Aprenderás que el campo mente mientras experimentaba con

eléctrico es un almacén de energía y que la energía puede transportarse grandes distan-oscilaciones eléctricas en un nuevo

tubo de vacío en 1946. Intrigado,

cias en un campo eléctrico. La energía que viaja en un campo eléctrico puede dirigirse colocó algunos granos de maíz cerca

y guiarse mediante alambres metálicos, o puede unirse a un campo magnético para del tubo y los vio reventar. El naci-moverse por el espacio vacío. Regresarás a esta idea en el Capítulo 23 y más adelante, miento del horno de microondas

cuando aprendas acerca de la radiación electromagnética.

siguió poco después.

Blindaje eléctrico

Una diferencia importante entre los campos eléctricos y los gravitacionales es que los campos eléctricos pueden blindarse mediante varios materiales, en tanto que los campos gravitacionales no pueden blindarse. La cantidad de blindaje depende del material usado para blindar. Por ejemplo, el aire hace que el campo eléctrico entre dos objetos cargados sea un poco más débil de lo que sería en el vacío, mientras que el aceite colocado entre los objetos puede disminuir el campo hasta casi una centésima parte de su intensidad original. El metal puede blindar por completo un campo eléctrico. Es muy interesante que, cuando no fluye corriente, el campo eléctrico dentro de un metal es cero, sin importar la intensidad del campo exterior.

Considera, por ejemplo, los electrones sobre una bola metálica esférica. Debido a la repulsión mutua, los electrones se dispersarán de manera uniforme sobre la superficie exterior de la bola. No es difícil ver que la fuerza eléctrica ejercida sobre una carga de prueba colocada exactamente en el centro de la bola es cero, porque las fuerzas

opuestas se equilibran en todas direcciones. Es muy interesante que la cancelación completa ocurra en cualquier parte dentro de una esfera conductora. Para entender por qué esto es así se necesita pensar más y tiene que ver con la ley del inverso al cuadrado P

y un poco de geometría. Considera la carga de prueba en el punto P de la Figura 22.19.

La carga de prueba está al doble de distancia del lado izquierdo de la esfera cargada de A

B

lo que está del lado derecho. Si la fuerza eléctrica entre la carga de prueba y las cargas dependiera sólo de la distancia, entonces la carga de prueba sería atraída sólo 1/4 parte hacia la izquierda de lo

que es atraída hacia la derecha. (Recuerda la ley del inverso al cuadrado: doble de distancia significa sólo 1/4 parte del efecto, tres veces la distancia F I G U R A 2 2 . 1 9

significa sólo 1/9 parte del efecto, y así sucesivamente.) Pero la fuerza también depende La carga de prueba en P es atraída con la de la cantidad de carga. En la figura, los conos que se extienden del punto P a las áreas misma intensidad hacia la mayor canti-A y B tienen el mismo ángulo en el ápice, pero uno tiene el doble de altitud que el dad de carga en la región más alejada A

otro. Esto significa que el área A en la base del cono más largo es 4 veces el área B en que hacia la menor cantidad de carga en

la base del cono más corto, lo que es cierto para cualquier ángulo en el ápice. Dado la región más cercana B. La fuerza neta

que 1/4 parte de 4 es igual a 1, una carga de prueba en P es atraída igualmente hacia sobre la carga de prueba es cero, ahí y

cada lado. Ocurre una cancelación. Un argumento similar se aplica si los conos que en cualquier otra parte en el interior del

conductor. El campo eléctrico en todo

emanan del punto P están orientados en cualquier dirección. La cancelación completa el interior también es cero.

ocurre en todos los puntos dentro de la esfera. (Recuerda este argumento del Capítulo 9, Figura 9.25, para la cancelación de la gravedad dentro de un planeta hueco. La bola metálica se comporta de la misma forma, sea hueca o no, porque toda su carga se reúne sobre su superficie exterior.)

Si el conductor no es esférico, entonces la distribución de carga no será uniforme.

En la Figura 22.20 se muestra la distribución de carga sobre conductores con formas diversas. La mayor parte de la carga sobre un cubo conductor, por ejemplo, se repele mutuamente hacia las esquinas. Lo extraordinario aquí es esto: la distribución de carga exacta sobre la superficie de un conductor es tal que el campo eléctrico en todo el interior del conductor es cero. Míralo de esta forma: si hubiera un campo eléctrico dentro de un conductor, entonces los electrones libres en el interior del conductor se pondrían en movimiento. ¿Qué tan lejos se moverían? Hasta que se establezca

el equilibrio, que es, por decir, cuando las posiciones de todos los electrones producen un campo cero dentro del conductor.

F I G U R A 2 2 . 2 0

La carga eléctrica se distribuye sobre la superficie de todos los conductores de tal forma que el campo eléctrico en el interior de los conductores es cero.

No es posible blindarse uno mismo de la gravedad, porque la gravedad sólo atrae.

No hay partes repelentes de gravedad para compensar las partes de atracción. Sin em-F I G U R A 2 2 . 2 1

bargo, el blindaje de los campos eléctricos es muy simple. Rodéate a ti, o a cualquier Los electrones provenientes del relámpa-cosa que quieras blindar, con una superficie conductora. Pon esta superficie en un go se repelen entre sí hacia la superficie

campo eléctrico de cualquier intensidad de campo. Las cargas libres en la superficie metálica exterior. Aunque el campo eléc-conductora se ordenarán solas sobre la superficie del conductor de tal forma que todas trico que establecen los electrones puede

las aportaciones interiores del campo se cancelarán entre sí. Es por eso que ciertos com-ser muy grande afuera del automóvil, el

campo eléctrico neto adentro del auto-

ponentes electrónicos están encerrados en cajas metálicas y determinados cables tienen móvil es cero.

una cubierta metálica: para blindarlos de la actividad eléctrica exterior.

22.9 Potencial eléctrico

Cuando estudiaste la energía en el Capítulo 7, aprendiste que un objeto tiene energía potencial gravitacional debido a su ubicación en un campo gravitacional. De igual modo, un objeto cargado tiene energía potencial (EP) en virtud de su ubicación en un campo eléctrico.

Tal como se necesita trabajo para levantar un objeto masivo contra el campo gravitacional de la Tierra, se necesita trabajo para empujar una partícula cargada contra el campo eléctrico de un cuerpo cargado. Este trabajo cambia la energía potencial eléctrica de la partícula cargada.7 Considera la partícula con la pequeña carga positiva ubicada a cierta distancia de una esfera con carga positiva de la Figura 22.22b. Si acercas la partícula a la esfera, gas-tarás energía para superar la repulsión eléctrica; esto es: harás trabajo al empujar la partícu -

la cargada contra el campo eléctrico de la esfera. Este trabajo realizado al mover la partícula a su nueva ubicación aumenta su energía. A la energía que la partícula posee en virtud de su ubicación se le llama energía potencial eléctrica. Si la partícula se libera, acelera en una dirección que se aleja de la esfera y su energía potencial eléctrica cambia a energía cinética.

F I G U R A 2 2 . 2 2

(a) El resorte tiene más EP mecánica

cuando se comprime. (b) La partícu-

la cargada igualmente tiene más EP

eléc trica cuando se acerca a la esfera

cargada. En ambos casos, el aumento de

F

F

EP es resultado de la entrada de trabajo.

(a)

(b)

Si en vez de ello empujas una partícula con el doble de carga, haces el doble de trabajo al empujarla, de modo que la partícula con doble carga en la misma ubicación tiene el doble de energía potencial eléctrica que antes. Una partícula con tres veces la carga tiene tres veces más energía potencial, y así sucesivamente. En lugar de lidiar con la energía potencial de una partícula cargada, es conveniente, cuando se trabaja con partículas cargadas en un campo eléctrico, considerar la energía potencial eléctrica por unidad de carga. La unidad de carga eléctrica es el coulomb, de modo que la energía potencial eléctrica se considera por cada coulomb de carga. Entonces, en cualquier ubicación, la energía potencial eléctrica por coulomb será la misma, sin importar cuánta carga haya.

Por ejemplo, un objeto con 10 coulombs de carga en una ubicación específica tiene 10

VIDEO: Potencial eléctrico

veces tanta energía potencial eléctrica como un objeto con 1 coulomb de carga.

F I G U R A 2 2 . 2 3

(a) La EP (energía potencial gravitacio-

EP

EP

nal) de una masa sostenida en un campo

gravitacional, cuando se libera, se trans-

forma en EC (energía cinética). (b) La

EP de una partícula cargada sostenida

EC

en un campo eléctrico, cuando se libera,

EC

se convierte en EC. ¿Puedes ver que la

EC adquirida por cada una es igual a la

(a)

(b)

disminución en EP?

7Este trabajo es positivo si aumenta la energía potencial eléctrica de la partícula cargada, y negativo si la reduce.

Pero 10 veces la energía potencial eléctrica para 10 veces la carga produce el mismo valor de energía potencial eléctrica por 1 coulomb de carga. La energía potencial eléctrica por unidad de carga tiene un nombre especial, potencial eléctrico: energía potencial eléctrica

Potencial eléctrico 5

carga

La unidad de medición para el potencial eléctrico es el volt, de modo que el potencial F I G U R A 2 2 . 2 4

eléctrico con frecuencia se llama voltaje. Un potencial de 1 volt (V) es igual a 1 joule (J) De los dos cuerpos cargados cerca del

domo cargado, el que tiene mayor carga

de energía por 1 coulomb (C) de carga:

posee la mayor EP eléctrica en el campo

del domo. Pero el potencial eléctrico de

joule

1 volt 1

cada uno es igual; lo mismo ocurre

coulomb

para cualquier cantidad de carga en la

misma ubicación. ¿Puedes ver por qué?

Por tanto, una batería de 1.5 volts produce 1.5 joules de energía por cada coulomb de carga que pasa por la batería. Ambos nombres, potencial eléctrico y voltaje, son comunes, de modo que puedes usar cualquiera. En este libro los nombres se usarán de manera indistinta.

El potencial eléctrico (voltaje) tiene la misma función para la carga que la presión tiene para los fluidos. Cuando existe una diferencia de presión entre dos extremos de una SCREENCAST: Potencial eléctrico

tubería llena con fluido, el fluido fluye del extremo de presión alta al extremo de presión más baja. En el Capítulo 23 verás que las cargas responden a las diferencias de potencial en forma similar.

Si frotas un globo en tu cabello, el globo se carga negativamente, ¡quizás varios miles de volts! Eso sería varios miles de joules de energía, si la carga fuera de 1 coulomb. Sin De modo que potencial eléctrico

embargo, 1 coulomb es una cantidad de carga muy grande. La carga en un globo frotado y voltaje significan la misma cosa

en cabello suele ser mucho menor que un millonésimo de coulomb. Por tanto, la canti-

(energía potencial eléctrica por uni-

dad de energía asociada al globo cargado es muy, muy pequeña. Un voltaje alto significa dad de carga) en unidades de volts.

mucha energía sólo si hay mucha carga de por medio. Hay una diferencia importante entre energía potencial eléctrica y potencial eléctrico.

¿5,000 volts?

F I G U R A 2 2 . 2 5

Aunque el potencial eléctrico (voltaje)

del globo cargado es alto, la energía

potencial eléctrica es baja debido a la

pequeña cantidad de carga. Por tanto,

cuando el globo se descarga, se transfie-

re muy poca energía.

P U N T O D E C O N T R O L

Si en la carga de prueba cerca de la esfera cargada de la Figura 22.22b Un alto voltaje a baja energía es

hubiera el doble de coulombs, ¿cómo se afectaría la energía potencial eléc-similar a las inofensivas chispas de

alta temperatura de una bengala

trica de la carga de prueba en relación con la esfera? ¿Cómo se afectaría su de fuegos artificiales. Recuerda

potencial eléctrico?

que la temperatura es la energía

cinética promedio por molécula, lo

cual significa que la energía total

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

es grande sólo para un número

El doble de coulombs significa que la carga de prueba tiene el doble de energía grande de moléculas. De igual

potencial eléctrica (porque el doble de trabajo puso a la carga en dicha ubicación).

modo, alto voltaje significa una

Pero el potencial eléctrico no se modificaría. El potencial eléctrico (medido en volts) gran cantidad de energía sólo para

es diferente de la energía potencial eléctrica (medida en joules). Asegúrate de comuna gran cantidad de carga.

prender esto antes de estudiar más.

C A PÍ T U LO 2 2 EL EC T ROS TÁT I C A

Almacenamiento de energía eléctrica

La energía eléctrica puede almacenarse en un dispositivo común denominado capacitor. El capacitor más simple es un par de placas conductoras separadas por una pequeña distancia, pero que no se tocan. Cuando las placas se conectan a un dispositivo de carga, como la batería que se muestra en la Figura 22.26, los electrones se transfieren de una placa a la otra. Esto ocurre a medida que la terminal positiva de la batería jala electrones de la placa conectada a ella. Dichos electrones, en efecto, son bombeados a través de la batería y por medio de la terminal negativa hacia la placa opuesta. Las placas del capacitor tienen entonces cargas iguales y opuestas: la placa positiva conectada a la terminal positiva de la batería y la placa negativa conectada a la terminal negativa.

El proceso de carga se completa cuando la diferencia de potencial entre las placas es igual a la diferencia de potencial entre las terminales de la batería: el voltaje de la bate- F I G U R A 2 2 . 2 6

ría. Cuanto mayor sea el voltaje de la batería, y más grandes y juntas las placas, mayor Un capacitor que consiste en dos placas será la carga que pueda almacenarse. En la práctica, las placas pueden ser delgadas ho- metálicas paralelas con espacios muy jas metálicas separadas por una delgada hoja de papel. Este "emparedado de papel" se estrechos entre sí. Cuando se conec- enrolla entonces para ahorrar espacio y se inserta en

tan a una batería, las placas adquieren

cargas iguales y opuestas. Entonces el

un cilindro. Tal capacitor práctico, junto con otros,

voltaje entre las placas coincide con la

se muestra en la Figura 22.28.

diferencia de potencial eléctrico entre las

Los capacitores se encuentran en casi todos los

terminales de la batería.

circuitos electrónicos. Un capacitor almacena energía

en unidades de flash fotográfico comunes. La rápida liberación de esta energía es evidente en la corta duración del destello. Lo mismo ocurre con un desfibrilador, donde cortas explosiones de energía se aplican a una víctima de ataque cardiaco. De igual modo, pero a una escala más grande, enormes cantidades de energía se almacenan en bancos de capacitores que impulsan láseres gigantes en los laboratorios nacionales.

La energía almacenada en un capacitor proviene del trabajo necesario para cargarlo. Descargar un capacitor cargado puede ser una experiencia peligrosa si sucede que tú eres la ruta conductora. La transferencia de energía que ocurre puede ser mortal donde hay presentes altos voltajes, como en la fuente de poder de un televisor, incluso después de que el aparato se apague. Ésta es la principal razón de las señales de advertencia en tales dispositivos. La energía se almacena en el campo eléctrico entre sus placas. Entre las placas paralelas, el campo eléctrico es uniforme, como se indica en la Figura 22.18c. De modo que la energía almacenada en un capacitor es la energía de su campo eléctrico. En el Capítulo 23 se hablará de la importancia de los capacitores en los circuitos eléctricos. Luego, en los Capítulos 25 y 26, verás cómo la energía proveniente del Sol se radia en forma de campos eléctricos y magnéticos. El hecho de que la energía esté contenida en los campos eléctricos es verdaderamente trascendental.

FIGURA 22.27
Mona El Tawil-Nassar ajusta las placas de un capacitor didáctico.

PUNTO DE CONTROL

F I G U R A 2 2 . 2 8

¿Cuál es la carga neta de un capacitor cargado?

Capacitores prácticos.

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Cero, porque las cargas en sus dos placas son iguales en número y opuestas en signo.

Incluso cuando el capacitor se descarga (por decir, al proporcionar una ruta para que la carga fluya entre las placas con carga opuesta) la carga neta del capacitor sigue siendo cero, porque entonces cada placa tiene carga cero.

Generador Van de Graaff

Un dispositivo de laboratorio común para producir altos voltajes y crear electricidad estática es el generador Van de Graaff, inventado por el físico estadounidense Robert J. van de Graaff en 1931 para suministrar el alto voltaje necesario para los primeros aceleradores de partículas. Estos aceleradores eran conocidos como aplastadores de átomos, porque aceleraban partículas subatómicas a rapideces muy altas y luego las "aplastaban" contra los átomos blanco. Las colisiones resultantes podían desprender protones y neutrones de los núcleos atómicos y crear radiación de alta energía como los rayos X y los rayos gamma. La capacidad para crear estas colisiones de alta energía es esencial para la física de partículas y nuclear. Los generadores Van de Graaff también son las máquinas de relámpagos que los científicos locos usaban en las antiguas películas de ciencia ficción. Un modelo pedagógico de un generador Van de Graaff suministra la carga estática para hacer que el cabello de Lillian se erice en la Figura 22.29.

FIGURA 22.29
Lillian, con la mano sobre un generador Van de Graaff cargado, está cargada a un voltaje alto, como lo demuestra la repulsión electrostática de su cabello.

La Figura 22.30 muestra el interior de un modelo simple del

generador. Una esfera metálica hueca está sostenida por un pe-

destal aislante cilíndrico. Un cinturón de caucho impulsado por un motor dentro del pedestal de soporte pasa por un conjunto de puntas metálicas con forma de peine que se mantienen a un gran potencial negativo en relación con la tierra. La descarga en las puntas deposita un suministro continuo de electrones en el cinturón, que después se
VIDEO: El generador Van de Graaff

llevan hacia la esfera conductora hueca. Dado que el campo eléctrico dentro de la esfera es cero, la carga no tiene impedimento para escapar hacia las puntas metálicas (pequeños pararrayos) dentro de la esfera. Los electrones se repelen entre sí hacia la superficie exterior de la esfera, tal como la carga estática siempre se encuentra en la superficie exterior de cualquier conductor. Esto deja el interior descargado y en condiciones de recibir más electrones conforme éstos se transportan en el cinturón. El proceso es continuo y la carga se acumula hasta que el potencial negativo sobre la esfera es mucho mayor que en la fuente de voltaje en el fondo, del orden de millones de volts.

Una esfera con un radio de 1 m puede elevarse a un potencial de 3 millones V antes de que ocurra una descarga eléctrica a través del aire. El voltaje puede aumentarse aún más si se aumenta el radio de la esfera o si se coloca todo el sistema en un con-La mayor amenaza para la civiliza-

tenedor lleno con gas a alta presión. Los generadores Van de Graaff pueden producir ción es el exceso de certeza.

voltajes de hasta 20 millones de V. Tocar uno puede ser una experiencia que ponga los pelos de punta.

Puntas colectoras

metálicas

Rodillo

Carga transportada

El campo eléctrico en el interior

por un cinturón

de la esfera metálica siempre es

aislante

cero, de modo que las cargas que

salen del cinturón no son repelidas

Soporte aislante

por la carga almacenada en el

exterior de la esfera

Puntas metálicas

V

Rodillo impulsado por motor

Fuente de voltaje

F I G U R A 2 2 . 3 0

Un modelo simple de un generador Van de Graaff.

C A PÍ T U LO 2 2 R E V ISI Ó N

425

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)
***Electricidad.** Término general para los fenómenos eléctricos,* ***Carga por contacto.** Transferencia de carga eléctrica entre*

muy parecido a lo que la gravedad tiene que ver con los

objetos mediante frotamiento o simple contacto.

fenómenos gravitacionales, o la sociología con los fenóme-

***Carga por inducción.** Redistribución de cargas eléctricas en*

nos sociales.

los objetos causada por la influencia eléctrica de un objeto

***Electrostática.** Estudio de la carga eléctrica en reposo (no en* cargado *cercano mas no en contacto.*

movimiento, como en las corrientes eléctricas).

Eléctricamente polarizado. Término aplicado a un átomo o

Conservación de la carga. La carga eléctrica no se crea ni se
molécula en el que las cargas están alineadas de modo que

destruye. La carga total antes de una interacción es igual a

un lado tiene un ligero exceso de carga positiva y el otro

la carga total después.

lado, un ligero exceso de carga negativa.

Ley de Coulomb. La relación entre la fuerza eléctrica, la carga
Campo eléctrico. Fuerza eléctrica por unidad de carga. El

y la distancia:

campo se puede considerar como un "aura" que rodea a los

q q

objetos cargados y es un almacén de energía eléctrica. En

1 2

F k

torno a un punto cargado, el campo disminuye con la dis-

2

d

tancia de acuerdo con la ley del inverso al cuadrado, como

Si las cargas son de signos iguales, la fuerza es de repulsión;

un campo gravitacional. Entre placas paralelas con cargas

si las cargas son distintas, la fuerza es de atracción.

opuestas, el campo eléctrico es uniforme:

Coulomb. La unidad del SI de carga eléctrica. Un coulomb

F

(símbolo C) es igual a la carga total de 6.25 3 1018

Campo eléctrico q

electrones.

Conductor. Cualquier material que tiene partículas cargadas

Energía potencial eléctrica. Energía que posee un objeto

libres que fluyen con facilidad por él cuando una fuerza

cargado en virtud de su ubicación en un campo eléctrico.

eléctrica actúa sobre ellas.

Potencial eléctrico. La energía potencial eléctrica por unidad
Aislante. Un material que no contiene partículas cargadas

de carga, medida en volts; con frecuencia llamada voltaje:

libres y por el cual las cargas no fluyen con facilidad.

energía potencial eléctrica

Voltaje

Semiconductor. Material con propiedades que están entre

carga

las de un conductor y las de un aislante, y cuya resistencia

puede modificarse si se agregan impurezas.

Capacitor. Dispositivo eléctrico (en su forma más simple,

un par de placas conductoras paralelas separadas por una

Superconductor. Material que es un conductor perfecto, con

pequeña distancia) que almacena carga eléctrica y energía.

resistencia cero al flujo de carga eléctrica.

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N

) 22.1 Electricidad

22.4 Ley de Coulomb

1. ¿Qué término se usa para la "electricidad en reposo"?

10. ¿Cómo se compara un coulomb de carga con la carga de

2. ¿Por qué la fuerza gravitacional entre la Tierra y la Luna

un solo electrón?

predomina sobre las fuerzas eléctricas?

11. ¿En qué se parece la ley de Coulomb a la ley de gravita-

ción de Newton? ¿En qué son diferentes?

22.2 Cargas eléctricas

3. ¿Qué parte de un átomo tiene carga positiva y qué parte

22.5 Conductores y aislantes

tiene carga negativa?

12. ¿Por qué los metales son buenos conductores tanto de

4. ¿Cómo se compara la carga de un electrón con la carga

calor como de electricidad?

de otro electrón? ¿Cómo se compara con la carga de un

13. ¿Por qué los materiales como el vidrio y el caucho son

protón?

buenos aislantes?

5. Por lo general, ¿cuál es la carga neta de un átomo?

14. ¿Cómo difiere un semiconductor de un conductor o de

un aislante?

22.3 Conservación de carga

15. ¿De qué está compuesto un transistor y cuáles son algu-

6. ¿Qué es un ión positivo? ¿Un ión negativo?

nas de sus funciones?

7. ¿Qué se entiende por conservación de la carga?

16. ¿Cómo difiere el flujo de corriente en un superconductor,

8. ¿Qué se entiende al decir que la carga está cuantizada?

comparado con el flujo en conductores ordinarios?

9. Menciona una partícula que tenga exactamente un

cuanto de unidad de carga.

22.6 Carga

17. ¿Qué ocurre con los electrones en cualquier proceso de carga?

18. ¿Qué tipo de carga ocurre cuando te deslizas sobre una

26. ¿Por qué en el centro de un conductor esférico cargado no

superficie plástica?

hay ningún campo eléctrico?

19. ¿Qué tipo de carga ocurre durante las tormentas eléctricas?

27. Cuando las cargas se repelen entre sí y se distribuyen

20. ¿Cuál es el principal propósito de un pararrayos?

sobre la superficie de los conductores, ¿qué ocurre con el

campo eléctrico en el interior del conductor?

22.7 Polarización de la carga

21. En términos de carga neta, ¿cómo difiere un objeto eléctri-

22.9 Potencial eléctrico

camente polarizado de un objeto eléctricamente cargado?

28. ¿Cuánta energía se suministra a cada coulomb de carga

22. ¿Qué es un dipolo eléctrico?

que fluye por una batería de 1.5 V?

23. Ofrece un ejemplo de un dipolo eléctrico común.

29. Un globo puede cargarse con facilidad a varios miles de

volts. ¿Esto significa que tiene varios miles de joules

22.8 Campo eléctrico

de energía? Explica.

24. Ofrece dos ejemplos de campos de fuerza comunes.

30. ¿Dónde se almacena la energía en un capacitor?

25. ¿Cómo se define la dirección de un campo eléctrico?

P I E N S A Y R E A L I Z A (A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 31.
Demuestra la carga por fricción y la descarga por medio

33. Frota enérgicamente un peine

de puntas con un amigo que esté de pie en el otro extre-

a través de tu cabello o sobre

mo de una habitación alfombrada. Avancen uno hacia el

una prenda de lana y acércalo

otro arrastrando los pies sobre la alfombra, hasta que se

a un chorro de agua, peque -

toquen la nariz. Ésta puede ser una experiencia deliciosa-

ño pero continuo. ¿El chorro

mente hormigueante, dependiendo de cuán seco esté el

de agua se desvía?

aire y cuán puntiaguda tengan la nariz.

32. Escribe una carta al abuelo y cuéntale por qué está a

salvo en una tormenta eléctrica si se queda dentro de un

automóvil.

S U S T I T U Y E Y L I S T O (F A M I L I A R I Z A C I Ó N C O N E C U A C I O N E S)

q q

constante de proporcionalidad para la ley de Coulomb),

1 2

Ley de Coulomb: F = k 2

d

demuestra que la fuerza entre las cargas es 9 3 109 N.

35. Resuelve la fuerza en el problema anterior, cuando las

34. Dos cargas puntuales, cada una con 0.1 C de carga, están

cargas están separadas el doble de distancia.

separadas 0.1 m. Dado que k 5 9 3 109 N·m2/C2 (la

P I E N S A Y R E S U E L V E (A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) *36. Dos cargas puntuales están separadas 6 cm. La fuerza de*

40. Los físicos atómicos ignoran el efecto de la gravedad

atracción entre ellas es de 20 N. Encuentra la fuerza entre

dentro de un átomo. Para ver por qué, calcula y compara

ellas cuando están separadas 12 cm. (¿Por qué puedes resol-

las fuerzas gravitacional y eléctrica entre un electrón y un

ver este problema sin conocer las magnitudes de las cargas?)

protón separados 10210 m. Las cargas y masas se propor-

37. Supón que las cargas que se atraen entre sí en el problema

cionan en los forros de este libro.

anterior tienen la misma magnitud. Reordena la ley de

41. Una gota de tinta en una impresora industrial de

Coulomb y demuestra que la magnitud de cada carga es

inyección de tinta porta una carga de 1.6 3 10210 C y

2.8 3 1026 C (2.8 microcoulombs).

se desvía sobre papel por una fuerza de 3.2 3 1024 N.

38. Dos bolitas, cada una con una carga de 1 microcoulomb

Demuestra que la intensidad del campo eléctrico para

(1026 C), están separadas 3 cm (0.03 m). Demuestra que

producir esta fuerza es de 2 millones N/C.

la fuerza eléctrica entre ellas es de 10 N. ¿Cuál sería la

42. La diferencia de potencial entre una nube de tormenta

masa de un objeto que experimenta esta misma fuerza en

y el suelo es de 100 millones V. Si una carga de 2 C deste-

el campo gravitacional de la Tierra?

lla en un rayo de la nube a la Tierra, ¿cuál es el cambio de

39. Los que se dedican a la electrónica desprecian la fuerza

energía potencial de la carga?

de gravedad sobre los electrones. Para ver por qué, calcula

43. Una energía de 0.1 J se almacena en la esfera metálica

la fuerza de la gravedad de la Tierra sobre un electrón y
en la parte superior de un generador Van de Graaff. Una
compárala con la fuerza ejercida sobre el electrón por
chispa que porta 1 microcoulomb (1026 C) descarga la
un campo eléctrico de magnitud 10,000 V/m (un campo
esfera. Demuestra que el potencial de la esfera en relación
relativamente pequeño). La masa y la carga de un electrón
con tierra es 100,000 V.
se proporcionan en los forros de este libro.
C A PÍ T U LO 2 2 R E V ISI Ó N
427
44. Encuentra el cambio de voltaje cuando (a) un campo
exactitud las cargas en muchas gotas de aceite y descubrió
eléctrico realiza 12 J de trabajo sobre una carga de
que los valores eran múltiplos enteros de 1.6 3 10219 C: la
0.0001 C; y (b) el mismo campo eléctrico realiza 24 J
carga del electrón. Por esto ganó el Premio Nobel.
de trabajo sobre una carga de 0.0002 C.
Atomizador
45. En 1909, Robert Millikan fue el primero en encontrar la
carga de un electrón en su ahora famoso experimento de
la gota de aceite. En dicho experimento, pequeñas gotas
Gota de aceite
de aceite se rociaron en un campo eléctrico uniforme

Microscopio

entre un par de placas horizontales con cargas opuestas.

Las gotas se observaron con un ocular amplificador y el

a. Si una gota de 1.1 3 10214 kg de masa permanece

campo eléctrico se ajustó de modo que la fuerza ascenden-

estacionaria en un campo eléctrico de 1.68 3 105 N/C,

te sobre algunas gotas de aceite con carga negativa fuera

¿cuál es la carga de esta gota?

apenas suficiente para equilibrar la fuerza descendente

b. ¿Cuántos electrones más hay en esta gota de aceite

de la gravedad; esto es: cuando estaban suspendidas, la

particu lar (dada la carga actualmente conocida del

fuerza ascendente qE igualaba a mg. Millikan midió con electrón)?

P I E N S A Y C L A S I F I C A (A N Á L I S I S)

-4q

+2q

x

46. Los tres pares de esferas metálicas del mismo tamaño

47. A continuación se

tienen diferentes cargas sobre sus superficies, como se

muestran tres pares

indica. Cada par se junta, se le permite tocarse y luego se

distintos de cargas

+3q

+3q

separa. Clasifica, de mayor a menor, la cantidad total de

puntuales. Supón

x

carga sobre los pares de esferas después de la separación.

que los pares interac-

túan sólo uno con

el otro. Clasifica

+2q

-2q

+6

+2

+6

-2

+6

0

las magnitudes de las

x/2

fuerzas entre los

A

B

C

pares, de mayor a menor.

P I E N S A Y E X P L I C A (S Í N T E S I S)

48. A nivel atómico, ¿qué se entiende cuando se dice que algo está cargado eléctricamente?

49. ¿Por qué la carga generalmente se transfiere mediante electrones en lugar de mediante protones?

50. ¿Por qué los objetos con gran número de electrones usualmente no están cargados eléctricamente?

51. ¿Por qué con frecuencia las prendas se adhieren después de dar vueltas en una secadora de ropa?

52. ¿Por qué el polvo se atrae hacia un DVD frotado con un paño seco?

Defiende tu respuesta.

53. Cuando te peinas, arrastras electrones de tu cabello al peine. ¿Entonces tu cabello se carga positiva o negativa-

(Los electroscopios son útiles no sólo como detectores de carga, sino también para medir la cantidad de carga: cuanto más carga se transfiere a la bola, más se separan las hojas.)

57. Las hojas de un electroscopio cargado colapsan con el tiempo. A mayores altitudes, colapsan con más rapidez. ¿Por qué sucede esto? (Sugerencia: la existencia de rayos cósmicos se indicó por primera vez mediante esta observación.)

58. ¿Es necesario que un cuerpo cargado toque en realidad la bola del electroscopio para que las hojas se separen?

59. Un cristal de sal consiste en iones negativos y positivos.

¿Cómo se compara la carga neta de los iones negativos con

mente? ¿Y qué hay del peine?

la de los iones positivos? Explica.

54. En algunas casetas de peaje, un delgado alambre metálico

60. ¿Cómo puedes cargar un objeto negativamente sólo con

sobresale de la carretera y hace contacto con los automó-

la ayuda de un objeto con carga positiva?

viles antes de que lleguen al recolector de peaje. ¿Cuál es

61. Cuando un material se frota contra otro, los electrones

el propósito de este alambre?

saltan con facilidad de uno al otro pero los protones no.

55. ¿Por qué los neumáticos de los camiones que transportan

¿Por qué? (Piensa en términos atómicos.)

gasolina y otros fluidos inflamables se fabri-

62. ¿Qué te dice la ley del inverso al cuadrado acerca de la

can para ser conductores eléctricos?

relación entre fuerza y distancia?

56. Un electroscopio es un dispositivo simple

63. Los 5,000 trillones (5 3 1022) de electrones que se mue-

que consiste en una bola metálica que está

ven libremente en una moneda se repelen entre sí. ¿Por

unida mediante un conductor a dos delgadas

qué no salen disparados de la moneda?

hojas de metal protegidas de perturbaciones

64. ¿Cómo cambia la magnitud de la fuerza eléctrica entre

del aire en un frasco, como se muestra en el

un par de partículas cargadas cuando las partículas se

dibujo. Cuando la bola se toca con un cuerpo

mueven para estar a la mitad de la separación? ¿A un

cargado, las hojas que normalmente cuelgan

tercio de la separación?

rectas hacia abajo se separan. ¿Por qué?

65. ¿Cómo se compara la magnitud de la fuerza eléctrica

81. Si colocas un electrón libre y un protón libre en el mismo

entre un par de partículas cargadas cuando se llevan a la

campo eléctrico, ¿cómo se compararán las fuerzas que

mitad de su distancia de separación original? ¿A un cuar-

actúan sobre ellos?

to de su distancia original? ¿A cuatro veces su distancia

82. ¿Cómo se compararán las aceleraciones del protón y el

original? (¿Qué ley guía tus respuestas?)

electrón en el problema anterior?

66. Cuando duplicas la distancia entre un par de partículas

83. ¿Cómo se compararán las direcciones del viaje para el

cargadas, ¿qué ocurre con la fuerza entre ellas? ¿Ello

electrón y el protón en el problema anterior?

depende del signo de las cargas? ¿Qué ley defiende tu

84. ¿Por qué la magnitud del campo eléctrico es cero a medio

respuesta?

camino entre dos cargas puntuales idénticas?

67. Cuando duplicas la carga en sólo una de un par de partí-

85. Imagina un protón en reposo a cierta distancia desde

culas, ¿qué efecto tiene esto sobre la fuerza entre ellas? ¿El

una placa con carga negativa. Éste se suelta y choca con

efecto depende del signo de la carga?

la placa. Luego imagina el caso similar de un electrón en

68. Cuando duplicas la carga en ambas partículas en un par,

reposo a la misma distancia de una placa con carga similar

¿qué efecto tiene esto sobre la fuerza entre ellas? ¿Depen-

pero positiva. ¿En cuál caso la partícula en movimiento

de del signo de la carga?

tendrá mayor rapidez cuando ocurra la colisión? ¿Por qué?

69. La constante de proporcionalidad k en la ley de Coulomb

86. Un vector de campo gravitacional apunta hacia la Tierra;

es enorme en unidades ordinarias, en tanto que la cons-

un vector de campo eléctrico apunta hacia un electrón.

tante de proporcionalidad G en la ley de gravitación de

¿Por qué los vectores de campo eléctrico apuntan al lado

Newton es pequeña. ¿Qué indica esto acerca de las inten-

contrario de los protones?

sidades relativas de estas dos fuerzas?

87. Cuando un campo eléctrico se aplica a un recipiente poco

70. ¿Cómo es que las líneas de campo eléctrico indican la

profundo con aceite vegetal, ¿por qué los pequeños trozos

intensidad de un campo eléctrico?

de hilo que flotan en el aceite se alinean con el campo

71. ¿Cómo se indica la dirección de un campo eléctrico con

como brújulas en un campo magnético?

las líneas de campo eléctrico?

88. Supón que un archivero metálico está cargado. ¿Cómo

72. Supón que la intensidad del campo eléctrico alrededor de

se compara la concentración de carga en las esquinas del

una carga puntual aislada tiene cierto valor a una distan-

archivero con la concentración de carga en las partes pla-

cia de 1 m. ¿Cómo se comparará la intensidad del campo

nas del archivero?

eléctrico a una distancia de 2 m de la carga puntual?

89. Si utilizas 10 J de trabajo para empujar una carga de 1 C

¿Qué ley guía tu respuesta?

contra un campo eléctrico, ¿cuál sería su cambio de voltaje?

73. En el fenómeno de la superconductividad, ¿qué ocurre

90. Cuando se libera, ¿cuál es la energía cinética de la carga

con la resistencia eléctrica a bajas temperaturas?

de 1 C del problema anterior, si pasa volando por su posi-

74. Las mediciones demuestran que existe un campo eléc-

ción de partida?

trico que rodea la Tierra. Su magnitud es de cerca de

91. ¿Cuál es el voltaje en la posición de una carga de 0.0001 C

100 N/C en la superficie de la Tierra y apunta hacia

que tiene una energía potencial eléctrica de 0.5 J (ambas

adentro, hacia el centro de la Tierra. A partir de esta in -

medidas en relación con el mismo punto de referencia)?

formación, ¿puedes establecer si la Tierra está cargada

92. ¿Por qué es seguro permanecer dentro de un automóvil

negativa o positivamente?

durante una tormenta eléctrica?

75. ¿Por qué los pararrayos suelen estar a una mayor

93. ¿Cómo se comparan las cargas sobre las placas opuestas

elevación que los edificios que protegen?

de un capacitor?

76. ¿Por qué los zapatos con clavos metálicos no son una

94. Con la finalidad de almacenar más energía en un capaci-

buena idea para los golfistas en un día de tormenta?

tor de placas paralelas cuyas placas difieren por un voltaje

77. Si se aplica un campo eléctrico suficientemente grande,

fijo, ¿qué cambio harías en las placas?

incluso un aislante conducirá una corriente eléctrica,

95. ¿Por qué es peligroso tocar las terminales de un capacitor
como lo demuestran los rayos que atraviesan el aire.
de alto voltaje incluso después de que el circuito de carga
Explica cómo ocurre esto y ten en cuenta las cargas
se apaga?
opuestas en un átomo y cómo sucede la ionización.
96. Un electrón volt (eV) es una unidad de energía. ¿Qué es
78. Si frotas un globo inflado contra tu cabello y lo colocas
más grande: un GeV o un MeV?
contra una puerta, ¿qué mecanismo hace que se pegue?
Explica.
97. ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico dentro del
domo de un generador Van de Graaff cargado?
79. Cuando un automóvil se mueve dentro de una cámara de
pintura, una vaporización de pintura se rocía alrededor
98. ¿Sentirías algún efecto eléctrico si estuvieras adentro de la
de su cuerpo. Cuando al cuerpo se le aplica una súbita
esfera cargada de un generador Van de Graaff? ¿Por qué
carga eléctrica y la vaporización se atrae hacia él, listo: el
sí o por qué no?
automóvil se pinta rápida y uniformemente. ¿Qué tiene
99. Un amigo dice que la razón por la que el cabello se eriza
que ver con esto el fenómeno de la polarización?
cuando tocas un generador Van de Graaff cargado es

80. ¿Cómo es que un átomo cargado (un ión) puede atraer a

simplemente que los cabellos se cargan y son tan ligeros

un átomo neutro?

que la repulsión entre los cabellos es visible. ¿Estás de

acuerdo o en desacuerdo?

C A PÍ T U LO 2 2 R E V ISI Ó N

429

P I E N S A Y D I S C U T E (E V A L U A C I Ó N)

100. Cuando sacas tu traje de lana de la bolsa de la tintorería,

106. Si una tormenta eléctrica te sorprende fuera de casa,

la bolsa queda con carga positiva. Discute cómo es que

¿por qué no debes pararte bajo un árbol? ¿Puedes pen-

ocurre esto.

sar en una razón por la que no debas pararte con las

101. El plástico para envolver alimentos se carga eléctricamen-

piernas separadas? ¿O por qué acostarte puede ser peli-

te cuando lo sacas de su caja. Como resultado, es atraído

groso? (Sugerencia: considera la diferencia de potencial

hacia objetos como los contenedores de alimentos. ¿El

eléctrico.)

plástico se pega mejor a los contenedores plásticos o a los

107. Dos piezas de plás-

contenedores metálicos? Discute.

tico, un anillo com-

102. Hablando estrictamente, cuando un objeto adquiere una

pleto y un anillo

carga positiva por la transferencia de electrones, ¿qué ocu-

a la mitad, tienen

rre con su masa? Discute qué ocurre con su masa cuando

los mismos radios

adquiere una carga negativa. (¡Piensa en pequeño!)

y la misma densi-

103. Hablando estrictamente, ¿una moneda será un poco más

dad de carga. ¿Cuál

masiva si tiene una carga negativa o una carga positiva?

campo eléctrico en

Discute.

el centro tiene mayor magnitud? Discute y defiende

104. Es relativamente sencillo desprender los electrones

tu respuesta.

exteriores de un átomo pesado como el del uranio (que

108. El contacto con una bola metálica cargada no te produce

entonces se convierte en un ión uranio), pero es muy

ninguna lesión, aun cuando su voltaje pueda ser muy

difícil quitar los electrones interiores. Discute por qué

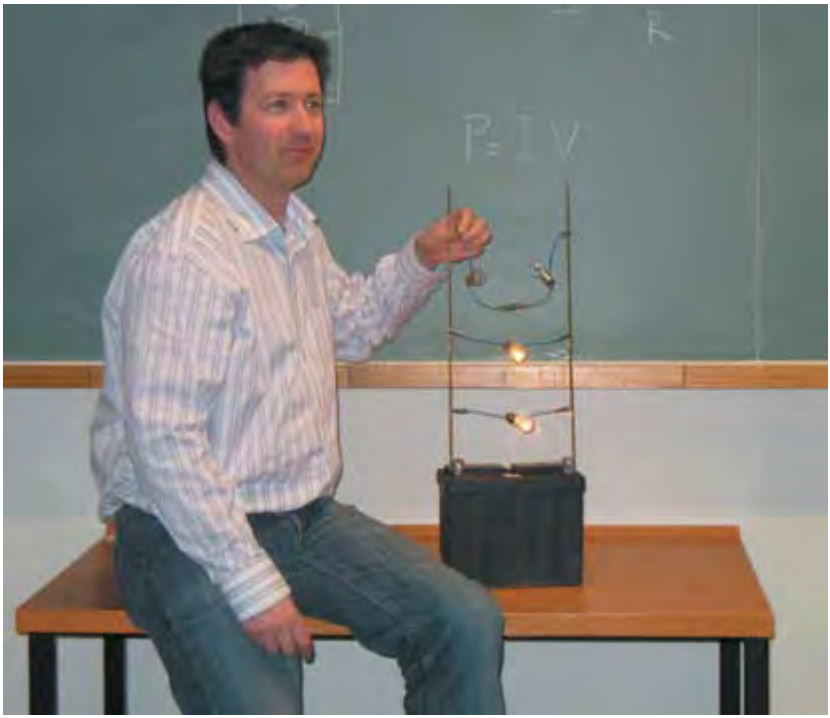
alto. ¿La razón es similar a la que explica por qué no

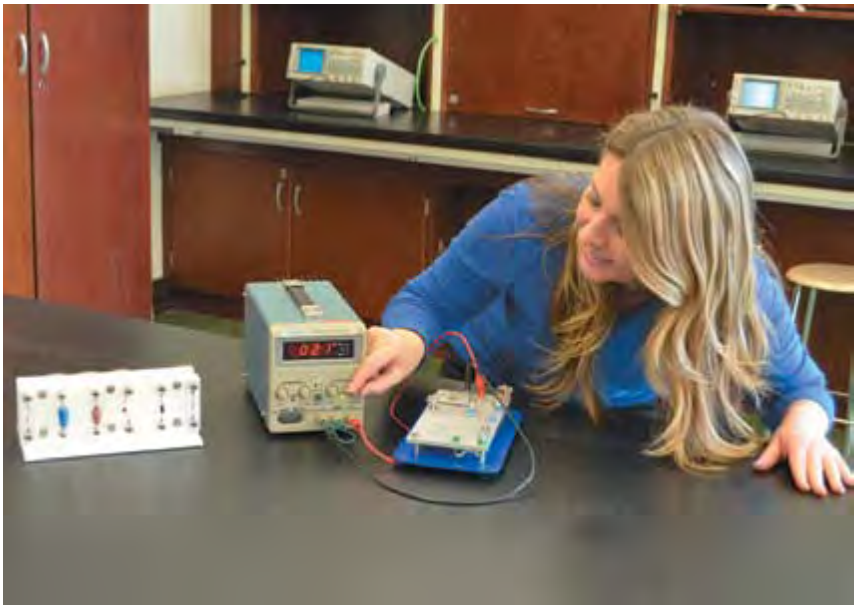
esto es así.

resultas dañado por las chispas de más de 1,000 C de

105. Si los electrones fuesen positivos y los protones fuesen negativos, discute si la ley de Coulomb se escribiría de la misma forma o de manera diferente.

una bengala de fuegos artificiales? Discute y defiende tu respuesta en términos de las energías involucradas.





23 1

C A P Í T U L O 2 3

Corriente

eléctrica

2

23.1 Flujo de carga y corriente eléctrica

3

23.2 Fuentes de voltaje

23.3 Resistencia eléctrica

23.4 La ley de Ohm

23.5 Corriente directa y corriente alterna

23.6 Rapidez y fuente de los electrones

en un circuito

23.7 Potencia eléctrica

23.8 Lámparas

23.9 Circuitos eléctricos

4

1 Para construir un circuito en paralelo, David Housden sujeta lámparas a terminales alargadas de una batería común de automóvil. Pide a sus alumnos que predigan el brillo relativo de las lámparas idénticas en la rama superior. 2 Juliet Layugan incita una polémica en su clase sobre las eficiencias relativas de las lámparas LED, CFL e incandescente. 3 Will Maynez muestra a su clase de laboratorio cómo conectar baterías en serie y luego en paralelo, y predecir los efectos sobre la iluminación de las lámparas. 4 La fuente de poder que Jill Johnsen muestra a sus estudiantes de laboratorio suministra 2.1 volts a través de un par de resistores en serie.

C A PÍ T U LO 23 CO R R I EN T E EL ÉC T R I C A

431

La corriente eléctrica es el flujo de carga, presiona- y se convirtió en tutor, pero continuó con su pasión por da a moverse por el voltaje y amortiguada por la estudiar matemáticas. Sus estudios rindieron frutos. De resistencia. La relación matemática entre las tres regreso a la Universidad de Erlangen, Ohm obtuvo su cantidades de corriente, voltaje y resistencia se atribuye al

doctorado en 1811 y se unió al personal docente de dicha

científico alemán Georg Simon universidad como profesor de matemáticas. Pero las cla-Ohm, quien nació en 1789. Su ses se pagaban tan mal que pronto las abandonó y pasó padre fue cerrajero y su madre los siguientes 6 años enseñando en escuelas mediocres de era hija de un sastre. Ninguno Bavaria. Durante esta época escribió un libro elemental tuvo educación formal. El padre

de geometría. El libro impresionó al rey Guillermo III de

autodidacta de Ohm impartió a

Prusia, quien ofreció a Ohm una posición de profesor en

sus hijos una excelente enseñan-

Colonia. Por fortuna, el laboratorio de física de la escuela

za en casa, y su hermano Mar-

estaba bien equipado, de modo que Ohm se dedicó a la

tin se convirtió en un conocido experimentación en física. Su experiencia práctica con las matemático.

actividades de cerrajería de su padre le resultó útil.

En 1805, a los 15 años de edad, Ohm ingresó a la Uni-

Ohm escribió mucho. Sin embargo, la ley de Ohm no

versidad de Erlangen. Pero, en lugar de concentrarse en

se apreció por completo en su época. Finalmente su obra

sus estudios, pasaba mucho tiempo bailando, patinando

fue reconocida en 1841 por la Royal Society, que le otorgó

en hielo y jugando billar. El padre de Ohm, enojado por-

la prestigiosa medalla Copley. Ohm llegó a ser profesor de

que Georg estaba desperdiciando su oportunidad educa-

física experimental en la Universidad de Munich, donde

tiva, lo envió a Suiza, donde, en septiembre de 1806, a permaneció hasta su muerte a los 65 años de edad.

los escasos 16 años de edad, se convirtió en profesor de

La unidad del SI de resistencia eléctrica, el ohm (sím-

matemáticas. Dejó su puesto de profesor 21/2 años después

bolo V), recibe su nombre en honor a él.

23.1 Flujo de carga y corriente eléctrica

A partir del estudio del calor y la temperatura, se sabe que, cuando los extremos de un material conductor están a diferente temperatura, la energía térmica fluye de la temperatura más alta a la temperatura más baja. El flujo cesa cuando ambos extremos alcanzan la misma temperatura. De igual modo, si los extremos de un conductor eléctrico están a potenciales eléctricos diferentes, cuando hay una diferencia de potencial, la carga fluye de un extremo al otro.1 El flujo de carga persiste en tanto haya una diferencia de potencial. Sin una diferencia de potencial no fluye carga. Conecta un extremo de un alambre a la esfera cargada de un generador Van de Graaff, por ejemplo, y el otro Presión

Presión

extremo a tierra, y una oleada de carga fluirá por el alambre. Sin embargo, el flujo será más alta

más baja

breve, porque la esfera alcanzará con rapidez un potencial común con la tierra.

(a)

Para lograr un flujo sostenido de carga en un conductor, se debe hacer algún arreglo que permita mantener una diferencia de potencial mientras la carga fluye de un extremo al otro. La situación es semejante a la del agua que fluye de un depósito más alto a uno más bajo (Figura 23.1a). El agua fluirá en una tubería que conecte los depósitos sólo mientras exista una diferencia en los niveles de agua. El flujo de agua en la tubería, al igual que el flujo de carga en el alambre que conecta el generador Van de Graaff al suelo, cesará cuando las presiones de los dos extremos sean iguales (esto es lo que

se da a entender cuando se dice que el agua busca su propio nivel). Un flujo continuo es Bomba

posible si la diferencia en los niveles de agua, y por tanto la diferencia de presiones del (b)

agua, se conserva con el uso de una bomba adecuada (Figura 23.1b).

F I G U R A 2 3 . 1

(a) El agua fluye del depósito de presión

más alta al depósito de presión más

1Cuando se dice que la carga fluye, se entiende que las partículas cargadas fluyen. La carga es una propiedad de baja. El flujo se detiene cuando cesa la

partículas singulares, más significativamente electrones, protones e iones. Cuando el flujo es de carga negativa, diferencia de presión. (b) El agua sigue electrones o iones negativos constituyen el flujo. Cuando el flujo de carga es positivo, protones o iones positivos fluyendo porque se mantiene una dife-son los que fluyen.

rencia de presión mediante la bomba.

432

PA R T E C I N CO

EL EC T R I CI DA D Y M AG N E T I SM O

P U N T O D E C O N T R O L

Bien, entonces, una diferencia de potencial a través de los extremos de un alambre produce una corriente. En lugar de decir diferencia de potencial, SCREENCAST: Agua y circuitos

de electrones

¿puedes decir también voltaje?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Sí. Recuerda del Capítulo 22 que diferencia de potencial y voltaje son términos que Con frecuencia uno piensa que

se usan de manera indistinta: la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos la corriente fluye por un circuito,

pero no lo digas cerca de alguien

en una ruta conductora. Ambos se miden en unidades de volts.

muy quisquilloso con la gramática

porque la expresión “la corriente

fluye” es redundante. Es más

Así como la corriente de agua es el flujo de moléculas de H O, la corriente eléc-correcto decir “la carga fluye”, que

2

es la corriente.

trica es tan sólo el flujo de carga eléctrica. En los circuitos de alambres metálicos, los electrones constituyen el flujo de carga. Esto es así porque uno o más electrones de cada átomo metálico tienen libertad de moverse a lo largo de la retícula atómica. Estos portadores de carga se llaman electrones de conducción. Los protones, por otra parte, no se mueven porque están ligados en el interior de los núcleos de los átomos que están Con frecuencia se menciona a

más o menos bloqueados en posiciones fijas. Sin embargo, en los fluidos conductores Andre Marie Ampere como “el

—como en una batería de automóvil— tanto iones positivos como electrones compo-Newton de la electricidad”. En la

nen el flujo de la carga eléctrica.

década de 1820, demostró que

La tasa de flujo eléctrico se mide en amperes. Un ampere es una tasa de flujo igual a alambres paralelos que portaban

1 coulomb de carga por segundo. (Recuerda que 1 coulomb, la unidad estándar de car-corriente en la misma dirección

ga, es la carga eléctrica de 6.25 3 1018 electrones.) En un alambre que porta 5 amperes, se atraían mutuamente, y postuló

que la carga en circulación era

por ejemplo, 5 coulombs de carga pasan por cualquier sección transversal del alambre la que ocasionaba el magnetis-cada segundo. ¡Son muchos electrones! En un alambre que porta 10 amperes, el doble mo. En su honor, las unidades de

de electrones pasa por cualquier sección transversal cada segundo.

corriente son los amperes, con

frecuencia acortada a amps.

23.2 Fuentes de voltaje

Las cargas fluyen sólo cuando se "empujan" o se "impulsan". Para sostener la corriente es indispensable un dispositivo de bombeo apropiado que proporcione una diferencia de potencial eléctrico: un voltaje. Si cargas una esfera metálica positivamente y otra negativamente, puedes desarrollar un gran voltaje entre las esferas. Esta fuente de voltaje no es una buena bomba eléctrica porque, cuando las esferas se conectan con un conductor, los potenciales se igualan con una sola afluencia breve de cargas en movimiento, como si descargaras un generador Van de Graaff. No es práctico. Los generadores o las baterías químicas, por otra parte, son bombas adecuadas en los circuitos eléctricos y pueden F I G U R A 2 3 . 2

mantener un flujo estable.

Cada coulomb de carga que fluye en un

Las baterías y los generadores eléctricos realizan trabajo para alejar las cargas nega-circuito que conecta los extremos de esta tivas de las positivas. En general, mas no siempre, en las baterías químicas este trabajo pila de linterna de 1.5 V está energizada

lo realiza la desintegración química de zinc o plomo en ácido, y la energía almacenada con 1.5 J.

en los enlaces químicos se convierte en energía potencial eléctrica.2 Los generadores, como los alternadores en los automóviles, separan carga mediante inducción electromagnética, un proceso que se describirá en el Capítulo 25. El trabajo realizado por cualquier medio para separar las cargas opuestas se encuentra en las terminales de la batería o generador. Estos valores diferentes de energía por carga crean una diferencia Una sola pila de linterna suminis-de potencial (voltaje). Este voltaje proporciona la "presión eléctrica" que mueve los tra 1.5 V. Dentro de una batería

electrones por un circuito.

de 9 V hay seis pilas pequeñas de

1.5 V cada una.

2La vida de una batería depende del tiempo que comparte su energía química con los dispositivos del circuito. Al igual que las tuberías de agua que se obstruyen con el uso excesivo y el paso del tiempo, las baterías acumulan resistencia que acorta aún más sus vidas útiles. Una explicación de cómo funcionan las baterías puede encontrarse en casi cualquier libro de química.

C A PÍ T U LO 23 CO R R I EN T E EL ÉC T R I C A

433

La unidad de la diferencia de potencial eléctrico (voltaje) es el volt.3 Una batería de automóvil común proporciona una presión eléctrica de 12 V a un circuito conectado a través de sus terminales. Entonces, a cada coulomb de carga se le suministran 12 J de energía que se hace fluir en el circuito unido a dichas terminales.

Suele haber cierta confusión acerca de la carga que fluye dentro de un circuito y el voltaje colocado, o establecido, en un circuito. Para

distinguir entre estas ideas, piensa en una tubería larga llena de agua. El agua fluirá dentro de la tubería si existe una diferencia de presión en (o entre) sus extremos. El agua fluye del extremo de presión alta al extremo de presión baja. Sólo el agua fluye, no la presión. De igual modo, la F I G U R A 2 3 . 3

carga eléctrica fluye debido a las diferencias de presión eléctrica (voltaje). Puedes decir Una fuente inusitada de voltaje. El que las cargas fluyen dentro de un circuito debido a un voltaje aplicado en el circuito. potencial eléctrico entre la cabeza y la No dices que el voltaje fluye dentro de un circuito. El voltaje no va a ningún lado; la cola de la anguila eléctrica (Electrophorus electricus) puede ser de hasta 600 V.

carga es la que se mueve. El voltaje produce una corriente (si hay un circuito completo).

Guarda tus baterías en un lugar

P U N T O D E C O N T R O L

frío y seco. Si las pones en un refri-

¿El voltaje entre dos puntos en un circuito eléctrico guarda relación con el gerador durarán un poco más.

flujo de los electrones entre los puntos?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Sí, y pronto verás que guarda relación con la cantidad de energía dada a los electrones.

Mientras Alessandro Volta experi-

mentaba con metales y ácidos en

1791, tocó una cuchara de plata

y un pedazo de estaño con la

23.3 Resistencia eléctrica

lengua (la saliva es un poco ácida)

y las conectó con un pedazo de

Se sabe que una batería o generador de algún tipo es el motor principal y la fuente de alambre de cobre. El gusto amargo

voltaje de un circuito eléctrico. Cuánta corriente existe depende no sólo del voltaje indicaba electricidad. Prosiguió

sino también de la resistencia eléctrica que ofrece el conductor al flujo de carga. Esto con el ensamblado de una pila de

es similar a la tasa a la que fluye el agua en una tubería, que depende no sólo de la celdas para construir una batería.

diferencia de presión entre los extremos de la tubería, sino también de la resistencia En honor a Volta, el potencial eléctrico se mide en "volts". (Toca las

que ofrece la propia tubería. Una tubería corta ofrece menos resistencia al flujo de dos terminales de una batería de

agua que una tubería larga; cuanto más ancha sea la tubería, menor será la resistencia.

9 volts con la lengua para experi-

Lo mismo ocurre con la resistencia de los alambres que portan corriente. La resisten-mentar esto por ti mismo.)

cia de un alambre depende tanto del grosor como de la longitud del alambre y de su conductividad particular. Los alambres gruesos tienen menos resistencia que los alambres delgados. Los alambres más largos tienen más resistencia que los alambres cortos.

El alambre de cobre tiene menos resistencia que el alambre de acero del mismo tamaño. La resistencia eléctrica también depende de la temperatura. Mientras mayores sean los empujones entre los átomos dentro del conductor, mayor será la resistencia que ofrezca el conductor al flujo de carga. En la mayoría de los conductores, un aumento de temperatura significa un aumento de resistencia.4 La resistencia de algunos materiales llega a cero a temperaturas muy bajas. Se trata de los superconductores estudiados brevemente en el Capítulo 22.

3La terminología de esta área de la física puede ser confusa, así que quizá sea conveniente aclarar algunos términos: potencial eléctrico y potencial significan la misma cosa: energía potencial eléctrica por unidad de carga. Sus unidades son los volts. El término voltaje por lo

general se usa para indicar la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos de una ruta conductora. Las unidades de voltaje también son los volts.

4El carbono es una excepción interesante. A medida que aumenta la temperatura, más átomos de carbono se quitan de encima un electrón. Esto aumenta la corriente eléctrica. De modo que la resistencia del carbono disminuye con el aumento de temperatura. Esto y su alto punto de fusión (principalmente) es por lo que el carbono se usa en las lámparas de arco.

F I G U R A 2 3 . 4

(a) En un circuito hidráulico, una tube-

ría estrecha (verde) ofrece resistencia al

Línea

Resistor

flujo de agua.

(b) En un circuito eléctrico, una

Interruptor

lámpara u otro dispositivo (que se

Válvula

muestran con el símbolo en zigzag para

resistencia) ofrecen resistencia al flujo de

Fuente de voltaje

electrones.

Bomba

(a)

(b)

La resistencia eléctrica se mide en unidades llamadas ohms. La letra griega mayúscula omega, V, se usa normalmente como símbolo del ohm. Como se mencionó al comienzo de este capítulo, a esta unidad se le llamó así en honor a Georg Simon Ohm, quien, en 1826, descubrió una relación simple y muy importante entre voltaje, corriente y resistencia.

P U N T O D E C O N T R O L

Cuando los electrones fluyen en el delgado filamento de una lámpara experimentan "fricción". ¿Cuál es el resultado práctico de esto?

La unidad de resistencia eléctrica

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

es el ohm, V, como en la antigua

¡Calor y luz!

canción: "V, V on the Range".

23.4 La ley de Ohm

La relación entre el voltaje, la corriente y la resistencia se resume en la ley de Ohm.

Ohm descubrió que la corriente en un circuito es directamente proporcional al voltaje VIDEO: Ley de Ohm

establecido en el circuito e inversamente proporcional a la resistencia del circuito. En forma abreviada,

voltaje

Corriente = resistencia

SCREENCAST: Ley de Ohm

O, en unidades,

Amperes volts

= ohms

De modo que, para un circuito dado de resistencia constante, la corriente y el voltaje son proporcionales entre sí.5 Esto significa que se obtendrá el doble de corriente con el doble de voltaje. Cuanto mayor sea el voltaje, mayor será la corriente. Pero si la resistencia de un circuito se duplica, la corriente será la mitad de lo que sería de otro modo. Cuanto mayor sea la resistencia, menor será la corriente. La ley de Ohm tiene mucho sentido.

La ley de Ohm dice que una diferencia de potencial de 1 V establecida en un cir-F I G U R A 2 3 . 5

cuito que tenga una resistencia de 1 V producirá una corriente de 1 A. Si se aplica un Por una manguera gruesa fluye más

voltaje de 12 V al mismo circuito, la corriente será de 12 A. La resistencia de un cable agua que por una manguera delgada

de alimentación típico de una lámpara es mucho menor que 1 V, en tanto que una conectada al sistema de aguas de la

bombilla incandescente típica tiene una resistencia de más de 100 V. Una plancha o ciudad (misma presión de agua). Lo

un tostador eléctrico tiene una resistencia de 15-20 V. Recuerda que, para una dife-mismo ocurre con la corriente eléctrica

rencia de potencial dada, menos resistencia significa más corriente. En el interior de en alambres gruesos y delgados conectados a través de la misma diferencia de

potencial.

5Muchos textos utilizan V para voltaje, I para corriente y R para resistencia, y expresan la ley de Ohm como V IR. Entonces, I VR y R VI ; si cualesquiera dos variables son conocidas, la tercera puede encontrarse. Las unidades se abrevian V para volts, A para amperes y V para ohms.

C A PÍ T U LO 23 CO R R I EN T E EL ÉC T R I C A

435

dispositivos eléctricos como computadoras y receptores de televisión, la corriente se regula mediante elementos de circuito llamados resistores, cuya resistencia puede ser de algunos ohms o de millones de ohms.

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Cuánta corriente consume un resistor de 60 V cuando se le aplica un voltaje de 12 V?

2. ¿Cuál es la resistencia de un sartén eléctrico que consume 12 A cuando se conecta a un circuito de 120 V?

F I G U R A 2 3 . 6

Resistores. El símbolo de resistencia en

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

un circuito eléctrico es

.

1. 1/5

voltaje

12 V

A. De acuerdo con la ley de Ohm: Corriente =

=

= 0.2 A.

resistencia 60 Ω

2.

voltaje

120 V

10 V. Reordena la ley de Ohm: Resistencia =

=

= 10 .

Ω

corriente

12 A

La ley de Ohm y el choque eléctrico

Los efectos dañinos de un choque eléctrico son resultado de la corriente que pasa por el cuerpo. ¿Qué causa un choque eléctrico en el cuerpo: la corriente o el voltaje?

Por la ley de Ohm, puedes ver que esta corriente depende tanto del voltaje que se aplica como de la resistencia eléctrica del cuerpo humano. La resistencia del cuerpo, que depende de su condición, varía de unos 100 Ω ***si está mojado con agua salada, a cerca de***

500,000 Ω si la piel está muy seca. Si tocas los dos electrodos de una batería con los dedos secos, y completas el circuito que va de una mano a la otra, puedes esperar que ofrezcas una resistencia de aproximadamente 100,000 Ω. En general, no La corriente es un flujo de carga,

puedes sentir la corriente producida por 12 V, y 24 V apenas hormiguean. Si tu piel puesta en movimiento por el volta-está húmeda, 24 V pueden ser muy incómodos. La Tabla 23.1 indica los efectos de je y frenada por la resistencia.

diferentes cantidades de corriente sobre el cuerpo humano.

T A B L A 2 3 . 1 EFEC TO DE L AS CORRIENTES ELÉC TRIC AS

SOB RE EL CUE R P O

Corriente (A)

Efecto

0.001

Puede sentirse.

0.005

Es doloroso.

0.010

Causa contracciones musculares involuntarias

(espasmos).

0.015

Provoca pérdida de control muscular.

0.070

Si pasa a través del corazón, provoca trastornos graves;

puede ser letal si la corriente dura más de 1 s.

Muchas personas mueren cada año por la corriente de circuitos eléctricos comunes de 120 V. Si tocas una lámpara defectuosa de

120 V con la mano, mientras estás de pie sobre el suelo, hay una "presión eléctrica" de 120 V entre tu mano y el suelo, de modo que es probable que la corriente no sea suficiente para causar un daño serio. Pero si estás de pie descalzo en una tina húmeda conectada por su tubería al suelo, la resistencia entre tú y el suelo es muy pequeña. Tu resistencia global es tan baja que la diferencia de potencial VIDEO: Manipulación

de 120 V puede producir una corriente peligrosa en tu cuerpo. Manipular dispositivos de alambres eléctricos

eléctricos mientras te bañas definitivamente no debe hacerse. Las gotas de agua que se acumulan alrededor de los interruptores de encendido de dispositivos como secadoras de cabello pueden conducir corriente al usuario. Aunque el agua destilada es un buen

aislante, los iones en el agua de grifo ordinaria reducen mucho la resistencia eléctrica.

Estos iones son el resultado de los materiales disueltos, en especial sales. Por lo general, en tu piel queda una capa de sal producida por la transpiración que, cuando tu piel está húmeda, reduce la resistencia de la piel a algunos cientos de ohms o menos, dependiendo de la distancia sobre la que actúa el voltaje.

Para recibir un choque, debe haber una diferencia de potencial eléctrico entre una parte de tu cuerpo y otra. La mayor cantidad de la corriente pasará a lo largo de la trayectoria de menor resistencia eléctrica que conecta estos dos puntos. Supón que caes desde un puente y logras agarrarte de un cable eléctrico de alto voltaje, que detiene tu caída. Mientras no toques nada más con un potencial diferente, no recibirás ningún choque. Aun cuando el alambre esté a unos cuantos miles de volts sobre el potencial del suelo y tú cuelgues de él con las dos manos, no fluirá una carga considerable de una mano a la otra. Esto es así porque entre tus manos no hay una diferencia consi-F I G U R A 2 3 . 7

derable de potencial eléctrico. Sin embargo, si estiras una mano y agarras un alambre El ave puede pararse sin peligro sobre un con diferente potencial. . ¡zap! Todo mundo ha visto aves paradas en los alambres de alambre de alto potencial, ¡pero más vale alto voltaje. Cada parte de sus cuerpos está al mismo alto potencial que el alambre, que no trate de alcanzar y agarrar un

alambre cercano!

de modo que no sienten efectos nocivos.

P U N T O D E C O N T R O L

Si las dos patas de un ave sobre el alambre de alto potencial de un cable eléctrico están muy separadas, ¿no recibirá un choque?

VIDEO: Aves y alambres

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

de alto voltaje

No, porque no hay una diferencia considerable de potencial entre sus patas.

La mayoría de los enchufes y tomacorrientes eléctricos de hoy en día están alambrados con tres conectores en lugar de dos. Las dos patas principales de un enchufe eléctrico son para el cable portador de corriente de doble alambre, del cual una parte está "viva" (energizada) y la otra es neutra, mientras que la pata redonda se conecta a un alambre en el sistema eléctrico que está aterrizado: conectado directamente a tierra (Figura 23.8). Por tanto, el aparato eléctrico en el otro extremo del enchufe está conectado a los tres alambres. Si el alambre vivo del aparato por accidente entra en contacto con la superficie metálica del aparato y tú tocas el aparato, podrías recibir un choque F I G U R A 2 3 . 8

peligroso. Esto no ocurrirá cuando la cubierta del aparato esté aterrizada con el alambre La pata redonda conecta el cuerpo del

a tierra, lo que asegura que la cubierta del aparato siempre esté a potencial de tierra cero.

aparato directamente a tierra. En conse-

El choque eléctrico puede sobrecalentar los tejidos del cuerpo e interrumpir las cuencia, cualquier carga que se acumule

funciones nerviosas normales. Puede alterar los patrones eléctricos rítmicos que man-sobre un aparato se conduce a tierra, lo

tienen el latido cardiaco adecuado y puede alterar el centro nervioso que controla la que evita choques accidentales.

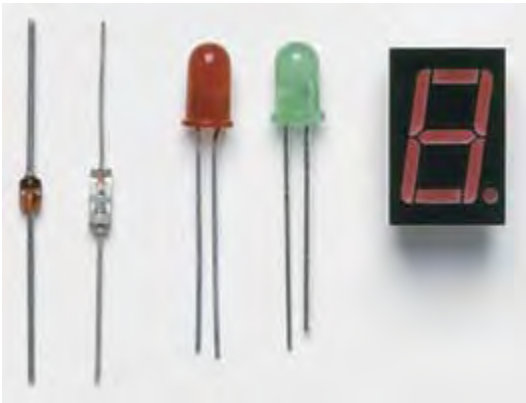
respiración. Para rescatar a una víctima de un choque, lo primero que debes hacer es ubicar y apagar la fuente de electricidad. Luego realizar reanimación cardiopulmonar (RCP) hasta que llegue la ayuda. Para víctimas de un ataque cardiaco, por otra parte, un choque eléctrico administrado de manera correcta en ocasiones puede ayudar a que el latido cardiaco se reanude.

P U N T O D E C O N T R O L

1. Si la resistencia de tu cuerpo es 100,000 Ω, ¿cuánta corriente experimentarás si tocas las terminales de una batería de 12 V?

2. Si tu piel está muy húmeda, de modo que tu resistencia sea de sólo 1,000 Ω, y nuevamente tocas las terminales de la batería, ¿cuánta

corriente experimentarás?



C A PÍ T U LO 23 CO R R I EN T E EL ÉC T R I C A

437

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1.

voltaje

12 V

Corriente =

=

= 0.00012 A.

resistencia 100,000 Ω

2.

voltaje

12 V

Corriente =

=

= 0.012 A. ¡Ay!

resistencia 1,000 Ω

23.5 Corriente directa y corriente alterna

CD

La corriente eléctrica puede ser CD o CA. Por CD, se entiende corriente directa, que se Corriente

refiere al flujo de cargas en una dirección. Una batería produce una corriente directa en Tiempo

un circuito porque cada terminal de una batería siempre tiene el mismo signo: la terminal positiva siempre es positiva, y la terminal negativa siempre es negativa. Los electrones se mueven de la terminal negativa que los repele a la terminal positiva que los atrae, y Corriente

CA

siempre se mueven por el circuito en la misma dirección. Inclusive si la corriente ocurre en pulsos inestables, siempre que los electrones se muevan sólo en una dirección, es CD.

Tiempo

La corriente alterna (CA) actúa como su nombre lo sugiere. Los electrones en el circuito se mueven primero en una dirección y luego en la dirección contraria, alternando F I G U R A 2 3 . 9

de ida y vuelta en torno a posiciones relativamente fijas. Esto se logra al alternar la po- Gráficas en el tiempo de CD y CA.

laridad del voltaje en el generador u otra fuente de voltaje. Casi todos los circuitos CA comerciales en Estados Unidos involucran voltajes y corrientes que alternan de ida y vuelta a una frecuencia de 60 ciclos por segundo. Esto es una corriente de 60 hertz. En algunos lugares se usan corrientes de 25 hertz, 30 hertz o 50 hertz. En todo el mundo, En los circuitos CA, 120 V es el pro-la mayoría de los circuitos residenciales y comerciales son CA porque la energía eléctri-medio "valor cuadrático medio"

del voltaje. El voltaje real en un

ca en la forma de CA puede subirse con facilidad a un voltaje alto para la transmisión a circuito CA de 120 V varía entre

largas distancias con pequeñas pérdidas de calor, y luego bajarse a voltajes convenientes 170 volts y 170 volts, lo que

donde se consuma la energía. En el Capítulo 25 estudiarás por qué esto es así.

suministra la misma potencia a una

El voltaje de CA en Estados Unidos suele ser de 120 V. En los primeros días de la plancha o a un tostador que un

electricidad, voltajes más altos quemaban los filamentos de las bombillas eléctricas.

circuito CD de 120 V.

Dice la leyenda que primero se adoptaron 110 V como estándar porque hacían que las bombillas de día brillaran tanto como una lámpara de gas. De modo que los cientos de plantas eléctricas construidas en Estados Unidos antes de 1900 producían electricidad a 110 V (o 115 V o 120 V). Para cuando la electricidad se generalizó en Europa, los ingenieros pensaron cómo fabricar bombillas que no se quemaran tan rápido a voltajes más altos. La transmisión de electricidad es más eficiente a voltajes más altos, de modo VIDEO: Corriente alterna

que Europa adoptó 220 volts como el estándar. Estados Unidos siguió usando 110 V

(en la actualidad, oficialmente 120 V) porque ya estaban instalados muchos equipos de 110 V. (Algunos electrodomésticos, como las estufas eléctricas y las secadoras de ropa, en la actualidad usan un voltaje más alto.)

El principal uso de la corriente eléctrica, ya sea CD o CA, es transferir energía de un modo silencioso, flexible y conveniente de un lugar a otro.

Conversión de CA a CD

La corriente doméstica es CA. La corriente en un aparato que funciona con baterías, como una laptop, es CD. Puedes hacer funcionar estos aparatos con CA en lugar de baterías si usas un convertidor CA-CD. Además de un transformador para reducir el voltaje (consulta el Capítulo 25), el convertidor utiliza un diodo, un pequeño dispositivo electrónico que actúa como válvula de una vía que permite el flujo de electrones sólo en una dirección (Figura 23.10). Dado que la corriente alterna cambia su direc- F I G U R A 2 3 .1 0

ción cada medio ciclo, la corriente pasa por un diodo sólo la mitad de cada periodo. Diodos. Como sugiere el símbolo

, la corriente fluye en la

La salida es una CD burda, y está apagada la mitad del tiempo. Para mantener una co- dirección de la flecha mas no en rriente continua mientras se suavizan los "brincos", se usa un capacitor (Figura 23.11). la dirección contraria.

(a)

(b)

(c)

(d)

F I G U R A 2 3 . 1 1

(a) Cuando la entrada a un diodo es CA, (b) la salida es una CD que pulsa. (c) La carga y descarga lentas de un capacitor suministran una corriente continua y más regular. (d) En la práctica, se usa un par de diodos, de modo que no hay brechas en la salida de corriente. El par de diodos invierte la polaridad de los medios ciclos alternos en lugar de eliminarlos.

Recuerda del Capítulo 22 que un capacitor actúa como un depósito de almacenamiento para carga. Así como se necesita tiempo para que el nivel de agua suba en un F I G U R A 2 3 . 1 2

depósito cuando se agrega agua, se necesita tiempo para agregar o quitar electrones de El agua puede entrar al depósito en

las placas de un capacitor. Por tanto, un capacitor produce un efecto retardador sobre forma de chorros o pulsos repetidos,

los cambios del flujo de carga. Se opone a los cambios de voltaje y suaviza la salida en pero la salida es en forma de un torrente

bastante regular. Lo mismo ocurre con

forma de pulsos.

un capacitor.

23.6 Rapidez y fuente de los electrones

en un circuito

Cuando se acciona el interruptor de luz en la pared y el circuito se completa, ya sea CA o CD, la lámpara parece brillar de inmediato. La corriente se establece a través de los alambres casi a la rapidez de la luz. No son los electrones los que se mueven con esta rapidez.6 Si bien los electrones dentro del metal a temperatura ambiente tienen una rapidez promedio de algunos millones de kilómetros por hora, no forman ninguna corriente porque se mueven en todas las direcciones posibles. No hay un flujo neto en ninguna dirección preferida. Pero, cuando se conecta una batería o un generador, en el interior del conductor se establece un campo eléctrico. Los electrones continúan sus movimientos aleatorios mientras que al mismo tiempo son empujados por este campo. El campo eléctrico es el que puede viajar por un circuito casi a la rapidez de la luz. El alambre conductor actúa como una guía o una "tubería"

para las líneas del campo eléctrico (Figura 23.13). En el espacio

afuera del alambre, el campo eléctrico tiene un patrón determinado por la ubicación de las cargas eléctricas, incluidas algunas cargas que se acumulan sobre la superficie del alambre. En el interior del alambre, el campo eléctrico se dirige a lo largo del alambre.

F I G U R A 2 3 . 1 3

(a) Las líneas de campo eléctrico corren a través del espacio de la terminal positiva a la terminal negativa de una batería.

(b) Cuando un alambre metálico grueso se conecta a las dos terminales, un campo eléctrico corre por el alambre, lo que impulsa una corriente, al tiempo que un campo eléctrico también se genera en el espacio que rodea al alambre por la carga que se acumula sobre la superficie del alambre. (No recibirás un choque si tocas este alambre de conexión, ¡pero puedes quemarte porque el alambre seguramente estará muy caliente!)

(a)

(b)

6Se invierte mucho esfuerzo y dinero para construir aceleradores de partículas que aceleren electrones y protones a rapideces cercanas a la de la luz. Si los electrones de un circuito común viajaran con dicha rapidez, con sólo doblar un alambre en un ángulo agudo los electrones que viajaran por el alambre tendrían tal cantidad de movimiento que no podrían dar la vuelta y saldrían disparados, ¡lo que proporcionaría un haz similar al producido por los aceleradores!

Si la fuente de voltaje es CD, como la batería que se muestra en la Figura 23.13, las líneas de campo eléctrico se mantienen en una dirección en el conductor. Los electrones de conducción se aceleran por el campo en una dirección paralela a las líneas de campo. Antes de adquirir una rapidez considerable, "rebotan" en los iones metálicos anclados en sus trayectorias y les transfieren parte de su energía cinética.

Es por esto que se calientan los alambres portadores de corriente. Estas colisiones interrumpen el movimiento de los electrones, de modo que la rapidez a la que migran por el alambre es en extremo baja. Este flujo neto de electrones es la velocidad F I G U R A 2 3 .1 4

de deriva. En un circuito CD común (por ejemplo, el sistema eléctrico de un auto- Las líneas sólidas sugieren la trayectoria móvil) los electrones tienen una velocidad de deriva que promedia alrededor de una aleatoria de un electrón que da empu-centésima de centímetro por segundo. A esta tasa, ¡un electrón tardaría más o menos jones en una retícula atómica con una rapidez promedio de más o menos

3 horas en recorrer 1 metro de alambre! Las corrientes grandes son posibles debido a 1/200 la rapidez de la luz. Las líneas la gran cantidad de electrones que fluyen. De este modo, aunque una señal eléctrica punteadas sugieren una vista exagera-viaje a casi la rapidez de la luz en un alambre, los electrones que se mueven en res- da e idealizada de cómo se altera esta puesta a esta señal en realidad viajan más lento que el paso de un caracol.

trayectoria cuando se aplica un campo

En un circuito CA, los electrones de conducción no avanzan en absoluto a lo largo eléctrico. El electrón se mueve hacia la del alambre. Oscilan en forma rítmica de ida y vuelta en torno a posiciones relati- derecha con una velocidad de deriva que vamente fijas. Cuando hablas con tus amigos por un teléfono fijo convencional, es es muy baja.

el patrón del movimiento oscilatorio el que se transmite a través de la ciudad a casi la rapidez de la luz. Los electrones que ya están en los alambres vibran al ritmo del patrón viajero.

Una idea equivocada que suele tenerse sobre las corrientes eléctricas es que la corriente se propaga por los alambres conductores mediante electrones que rebotan entre sí: que un pulso eléctrico se transmite en forma similar a la manera en que el pulso de una ficha de dominó golpeada se transmite a lo largo de una fila de fichas colocadas unas junto a otras. Esto simplemente no es cierto. La idea de las fichas de dominó es un buen modelo para la transmisión del sonido, mas no para la transmisión de la energía eléctrica. Los electrones que tienen libertad de movimiento en un conductor se aceleran por el campo eléctrico impuesto sobre ellos, no debido a que reboten entre sí. Cierto: rebotan unos con otros y con otros átomos, pero esto los desacelera y ofrece resistencia a su movimiento. Los electrones a lo largo de toda la trayectoria cerrada de un circuito Después de fracasar más de 6,000

veces antes de perfeccionar

reaccionan en forma simultánea al campo eléctrico.

la primera bombilla eléctrica,

Otra idea equivocada sobre la electricidad es la fuente de los electrones. En un Edison afirmó que sus ensayos no

depósito de materiales puedes comprar una manguera que esté vacía de agua. Pero habían sido fracasos porque logró

no puedes comprar un trozo de alambre, una "tubería de electrones", que esté vacía descubrir 6,000 formas que no

de electrones. La fuente de los electrones en un circuito es el material del circuito funcionaban.

conductor mismo. Algunas personas creen que los tomacorrientes eléctricos de las paredes de sus casas son una fuente de electrones. Suponen de manera incorrecta que los electrones fluyen desde la planta eléctrica, por las líneas de transmisión y hacia los tomacorrientes de sus casas. Esta suposición es falsa. Los tomacorrientes de las casas son CA. Los electrones no realizan una migración neta por un alambre en Thomas Edison hizo mucho más

un circuito CA.

que inventar una bombilla incan-

descente funcional en 1879. Resol-

Cuando conectas una lámpara en un tomacorriente, la energía fluye del toma-vió los problemas de construir los

corriente a la lámpara, no los electrones. La energía es transportada por el campo dínamos, los sistemas de cableado

eléctrico pulsátil y produce el movimiento vibratorio de los electrones que ya existen y las conexiones para alumbrar la

en el filamento de la lámpara. Si a una lámpara se le imprime un voltaje de 120 V, ciudad de Nueva York. Hizo que

entonces un promedio de 120 J de energía se disipa por cada coulomb de carga que el teléfono funcionara de manera

se hace vibrar. La mayor parte de esta energía eléctrica aparece como calor, en tanto adecuada y legó la grabación

que otra parte se transforma en luz. Las instalaciones eléctricas no venden electro-de música y películas. También

inventó un método de invención:

nes. Venden energía. Tú suministras los electrones.

su laboratorio de New Jersey fue

De este modo, cuando te sacude un choque eléctrico, los electrones que consti-el precursor de los modernos

tuyen la corriente en tu cuerpo se originan en tu cuerpo. Los electrones no salen del laboratorios de investigación

alambre y pasan a través de tu cuerpo hacia el suelo; lo hace la energía. La energía industriales.

tan sólo hace que los electrones libres ya existentes en tu cuerpo vibren al unísono. Las vibraciones pequeñas producen hormigueo; las vibraciones grandes pueden ser letales.

440

PA R T E C I N CO

EL EC T R I CI DA D Y M AG N E T I SM O

P U N T O D E C O N T R O L

Piensa en los integrantes de una banda musical que están de pie y en reposo. Puedes ponerlos en movimiento en dos formas: (1) Da a la última persona de la fila un empujón que viaje en cascada hasta la primera persona de la fila. (2) Emite la orden “adelante, marchen”.

¿Cuál de estas dos se

¿Por qué es correcto decir que la

asemeja a la forma en que se mueven los electrones en un circuito cuando energía de la batería de un auto-se cierra el interruptor, y cuál se parece a la forma en la que viaja el sonido?

móvil a final de cuentas proviene

del combustible que consume el

automóvil?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Emitir la orden "adelante, marchen" se parece a la manera como los electrones se mueven cuando perciben el campo eléctrico que energiza el circuito cuando se cierra el interruptor. Un integrante de la banda que choca contra el otro se parece a la forma en que viaja el sonido.

23.7 Potencia eléctrica

A menos que sea en un superconductor, una carga que se mueve en un circuito gasta energía. Esto puede resultar en el calentamiento del circuito o en el encendido de un motor. La tasa a la que la energía eléctrica se convierte en otra forma, como energía mecánica, calor o luz, se llama potencia eléctrica. La potencia eléctrica es igual al producto SCREENCAST: Potencia eléctrica

de la corriente y el voltaje:7

Potencia 5 corriente 3 voltaje

Si el voltaje se expresa en volts y la corriente en amperes, entonces la potencia se expresa en watts. De modo que, en unidades,

Watts 5 amperes 3 volts

Una bombilla incandescente de 60 W extrae una corriente de 0.5 A (60 W 5

0.5 A 3 120 V). Una bombilla de 100 W extrae alrededor de 0.8 A. Es interesante que una lámpara fluorescente compacta (CFL, por sus siglas en inglés) de 26 W proporcione más o menos la misma cantidad de luz que una bombilla incandescente de 100 W,

¡sólo un cuarto de la potencia por la misma luz!8

La relación entre energía y potencia es un asunto práctico. De la definición de potencia 5 energía por unidad de tiempo, se deduce que energía 5 potencia 3 tiempo. De modo que una unidad de energía puede ser una unidad de potencia multiplicada por una unidad de tiempo, como kilowatt-hora (kWh). Un kilowatt-hora es la cantidad de energía transferida en 1 hora a la tasa de 1 kW. Por tanto, en una localidad en la que la energía eléctrica cueste 15 centavos por kWh, una plancha de 1,000 W puede funcionar durante 1 hora a un costo de 15 centavos. Un refrigerador, que suele clasificarse en aproximadamente 500 W, cuesta menos por una hora, pero mucho más durante el transcurso de un mes.

P U N T O D E C O N T R O L

A 15¢/kWh, ¿cuánto cuesta hacer funcionar una secadora de cabello de 1,200 W durante 1 h?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

18¢: 1,200 W 5 1.2 kW, de modo que 1.2 kW 3 1 h 3 15¢/kWh 5 18¢.

7Recuerda, del Capítulo 7, que potencia 5 trabajo/tiempo; 1 watt 5 1 J/s. Observa que las unidades para potencia mecánica y potencia eléctrica coinciden (trabajo y energía se miden ambas en joules):
carga

energía

energía

Potencia =

×

=

tiempo

carga

tiempo

8Resulta que la fórmula de potencia, P 5 IV, no funciona para las CFL. Esto es así porque, en una CFL, el voltaje alterno y la corriente

están fuera de fase una con respecto a la otra, y el producto de la corriente y el voltaje es mayor que el consumo de potencia real. ¿Qué tan mayor? Revisa los datos impresos en la base de una CFL.

C A PÍ T U LO 23 CO R R I EN T E EL ÉC T R I C A

441

23.8 Lámparas

El brillo de las bombillas incandescentes puede determinarse por su vataje. Una bombilla de 100 W, por ejemplo, es más brillante que una bombilla de 60 W. Pero la mayor parte de la potencia que disipan estas bombillas no es luz, es calor. Al menos 90% de la energía transferida por una bombilla incandescente es calor. Por otra parte, las lámparas fluorescentes emiten mucho menos calor, por lo que puedes tocarlas sin quemarte. Las bombillas incandescentes se están sustituyendo por las CFL, que son un tipo de lámpara fluorescente que embona en un portalámparas estándar. Por el mismo vataje, las CFL emiten mucho más luz y mucho menos calor que las incandescentes. Es por ello que puedes sustituir una bombilla incandescente de 100 W con una CFL de alrededor de 25 W y obtener más o menos la misma cantidad de luz. De Un inconveniente de las CFL son las

modo que, a menos que uses bombillas incandescentes para calentar una habitación pequeñas cantidades de mercurio

(cosa que hacen los granjeros en los gallineros durante el invierno), es probable que te que contienen. No obstante, la

fuente más grande de emisiones

convenga más usar una CFL con un vataje menor. Además, la duración de las CFL

de mercurio en el ambiente son

suele ser de más de 10 veces la de las bombillas incandescentes.

las plantas eléctricas que que-

Una fuente de luz que dura incluso más tiempo es el diodo emisor de luz (LED, man carbón. De acuerdo con la

por sus siglas en inglés); el más rudimentario de éstos es la pequeña luz roja que te dice EPA, cuando se usa la energía del

si tu computadora u otro dispositivo electrónico están encendidos o apagados. Ahora carbón para iluminar una sola

lámpara incandescente durante

existen LED más grandes para iluminación general. Su costo más alto se compensa su vida normal, se libera más mer-con el ahorro de energía durante la larga vida de las bombillas.

curio al ambiente del que existe

Con las CFL y los LED que se usan en la actualidad, espera que las "antiguas"

en una CFL con una luminosidad

bombillas incandescentes sean historia. Y espera que las LED sustituyan a las CFL. En semejante.

el Capítulo 30 se regresará a la física de las CFL y las LED.

F I G U R A 2 3 . 1 6

F I G U R A 2 3 . 1 5

Las versiones más grandes de este LED

La potencia y el voltaje para esta CFL

común ahora tienen portalámparas con

están dados como “13 W 120 V”.

rosca.

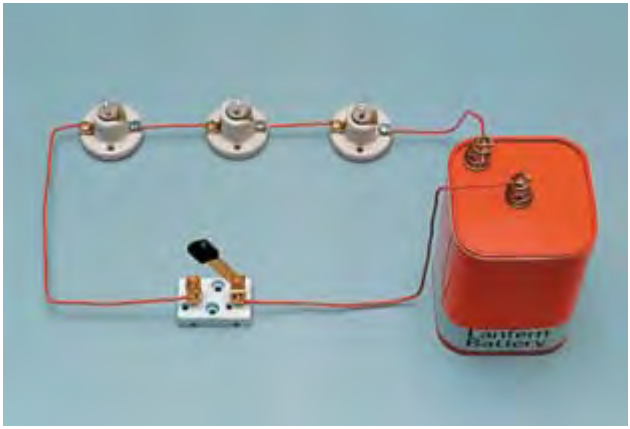
23.9 Circuitos eléctricos

Cualquier trayectoria a lo largo de la cual puedan fluir los electrones es un circuito. Para un flujo continuo de electrones debe haber un circuito completo, sin brechas. Por lo general, una brecha la proporciona un interruptor eléctrico que puede abrirse o cerrarse para cortar o permitir el flujo de energía. La mayoría de los circuitos tiene más de un VIDEO: Circuitos eléctricos

dispositivo que recibe energía eléctrica. En general, estos dispositivos se conectan en un circuito en una de dos formas, en serie o en paralelo. Cuando se conectan en serie, forman una sola ruta para el flujo de electrones entre las terminales de la batería, generador o tomacorriente de la pared (que sólo es una extensión de estas terminales).

Cuando se conectan en paralelo, forman ramas, cada una de las cuales es una ruta SCREENCAST: Caída de voltaje

aparte para el flujo de electrones. Las conexiones en serie y en paralelo tienen sus propias características distintivas. Se analizarán de manera breve los circuitos que utilizan estos dos tipos de conexiones.



442

PA R T E C I N CO

EL EC T R I CI DA D Y M AG N E T I SM O

Circuitos en serie

En la Figura 23.17 se muestra un circuito en serie simple. Todos los aparatos, lámparas en este caso, están conectados extremo con extremo y forman una sola ruta para los electrones. La misma corriente existe casi de inmediato en las tres lámparas, y también en la batería, cuando el interruptor se cierra. Cuanto más grande sea la corriente de SCREENCAST: Resistencia

una lámpara, más brillante es. Los electrones no se "apilan" en ninguna lámpara, sino equivalente

que fluyen a través de cada lámpara, en forma simultánea. Algunos electrones se alejan de la terminal negativa de la batería, algunos se mueven hacia la terminal positiva y algunos se mueven por el filamento de cada lámpara. Con el tiempo, es probable que los electrones se muevan por todo el circuito (la misma cantidad de corriente pasa a través de la batería). Ésta es la única ruta de los electrones a través del circuito. Un rompimiento en alguna parte de la ruta resulta en un circuito abierto, y el flujo de electrones se interrumpe. Con quemar el filamento de una de las lámparas o tan sólo abrir el interruptor, puede ocurrir dicho rompimiento.

Interruptor

F I G U R A 2 3 . 1 7

Un circuito en serie simple. La batería de

Fuente de voltaje

6 V proporciona 2 V a cada lámpara.

CELDAS DE COMBUSTIBLE

Una batería es un dispositivo de almacenamiento de energía. circulan autobuses con celdas de combustible, como Vancouver, Una vez que la energía química almacenada se convierte

Columbia Británica y Chicago, Illinois. En el futuro, tanto los

en energía eléctrica, su energía se agota. Entonces debe

edificios comerciales como las casas podrán dotarse con celdas

desecharse (si se trata de una batería desechable) o recargarse con un de combustible como una alternativa para recibir la electricidad

flujo opuesto de electricidad.

proveniente de las estaciones regionales.

Una celda de combustible, por otra parte, convierte la energía Entonces, ¿por qué las celdas de combustible no están tan

química de un combustible en energía eléctrica de manera continua

difundidas en la actualidad? Hoy en día son más costosas que otras

e indefinida, en tanto se le suministre el combustible. En una

fuentes de electricidad. Pero, sobre todo, existe la pregunta sobre

versión, el combustible de hidrógeno sufre una reacción química

la disponibilidad del combustible elegido —hidrógeno—. Si bien

con el oxígeno proveniente del aire y produce electrones e iones —y

el hidrógeno es el elemento más abundante en el Universo, y es

agua—. Los iones fluyen internamente dentro de la celda en una

abundante en los alrededores inmediatos, está alojado en moléculas

dirección; los electrones fluyen externamente por un circuito

de agua e hidrocarburos. No está disponible en estado libre (un unido en la otra dirección. Dado que esta reacción convierte hecho que AHORA pasan por alto las personas que celebran el uso directamente la energía química en electricidad, es más eficiente de vehículos impulsados con hidrógeno). Para separar el hidróge- que si el combustible se quemara para producir calor, lo cual, a su no de las moléculas en las que se encuentra firmemente ligado se vez, produce vapor que acciona turbinas para generar electricidad. necesita energía. La energía necesaria para producir hidrógeno en la El único "producto de desecho" de tal celda de combustible es agua actualidad la proporcionan fuentes de energía convencionales. pura, ¡adecuada para beber!

En efecto, el hidrógeno es un medio de almacenamiento de El transbordador espacial utiliza celdas de combustible de energía. Al igual que la electricidad, se crea en un lugar y se utiliza en hidrógeno para satisfacer sus necesidades eléctricas. (Su hidrógeno otro. El hidrógeno es un gas muy volátil, difícil de almacenar, y oxígeno se llevan a bordo en contenedores presurizados.) Las transportar y usar con seguridad. Las celdas de combustible celdas también producen más de 100 galones de agua potable para serán atractivas en el futuro, cuando se reduzcan al mínimo estas los astronautas durante una misión habitual de una semana de dificultades, cuando baje el costo de las celdas de combustible y, duración. En la Tierra, los investigadores perfeccionan las celdas

principalmente, cuando el hidrógeno necesario para alimentarlas se

de combustible para varios tipos de vehículos. En muchas ciudades

genere mediante otras fuentes de energía, como la eólica o la solar.

El circuito que se muestra en la Figura 23.17 ilustra las importantes características de los circuitos en serie:

1. La corriente eléctrica tiene una sola ruta a través del circuito. Esto significa que la corriente que pasa a través de la resistencia de cada dispositivo eléctrico

¿Qué es lo que se "agota" en un

circuito eléctrico: la corriente o la

a lo largo de la ruta es la misma.

energía?

2. A esta corriente se resiste la resistencia del primer dispositivo, la resistencia del segundo y también la del tercero, de modo que la resistencia total a la corriente en el circuito es la suma de cada una de las resistencias a lo largo de la ruta del circuito.

3. La corriente en el circuito es numéricamente igual al voltaje suministrado por la fuente, dividido entre la resistencia total del circuito. Esto coincide con la ley de Ohm.

SCREENCAST: Resistencias

4. El voltaje suministrado es igual a la suma de cada una de las "caídas de voltaje"

de un circuito

a través de cada dispositivo. Esto es consistente con el hecho de que la energía total suministrada al circuito es igual a la suma de las energías suministradas a cada dispositivo.

5. La caída de voltaje a través de cada dispositivo es proporcional a su resistencia: la Las palabras abierto y cerrado

ley de Ohm se aplica por separado a cada dispositivo. Esto se deduce del hecho como se aplican a una puerta son

de que más energía se disipa cuando una corriente pasa a través de una resistencia diferentes cuando se aplican a los

circuitos eléctricos. Para una puer-

grande que cuando la misma corriente pasa a través de una

resistencia pequeña.

ta, abierto significa paso libre y

Es fácil ver la principal desventaja de un circuito en serie: si un dispositivo falla, cerrado significa bloqueo. Con los

la corriente en todo el circuito cesa. En tiempos pasados, las luces de los árboles de interruptores eléctricos, los térmi-navidad estaban conectadas en serie. Cuando una bombilla se fundía, era divertido y nos tienen significados opuestos:

entretenido (o frustrante) tratar de localizar la bombilla que había que sustituir.

abierto significa sin flujo y cerrado

significa libre paso de electrones.

Casi todos los circuitos están alambrados de modo que sea posible hacer funcionar varios dispositivos eléctricos, cada uno de manera independiente de los demás. En tu casa, por ejemplo, una lámpara puede encenderse o apagarse sin afectar el funcionamiento de otras lámparas o dispositivos eléctricos. Esto es así porque dichos dispositivos no están conectados en serie, sino en paralelo unos con otros.

P U N T O D E C O N T R O L

1. En un circuito en serie, ¿qué ocurre con la corriente de las demás lámparas si se quema una lámpara?

2. En un circuito en serie, ¿qué ocurre con el brillo de la luz de cada lámpara cuando se agregan más lámparas al circuito?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. El circuito se rompe y todas las lámparas se apagan.

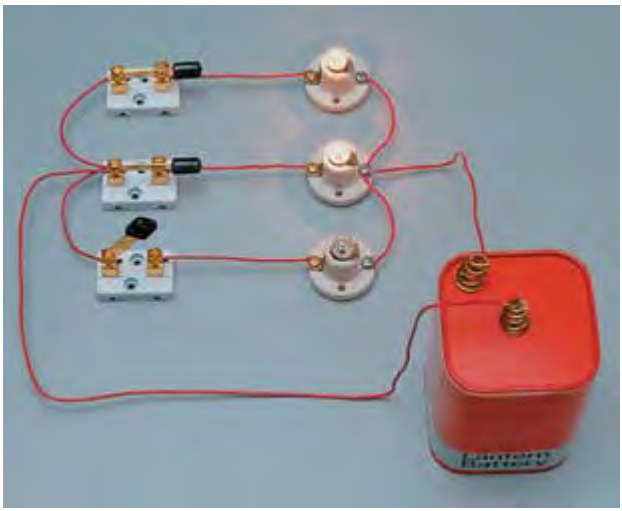
2. Agregar más lámparas en serie produce una resistencia de circuito más grande.

Esto reduce la corriente en el circuito. Todos los voltajes deben sumarse para dar el mismo voltaje total, de manera que la caída de voltaje a través de cada lámpara también disminuye. Dado que la potencia es el producto del voltaje y la corriente, estos dos cambios actúan para volver menos brillantes las lámparas.

Circuitos en paralelo

En la Figura 23.18 se muestra un circuito en paralelo simple. Las tres lámparas están conectadas a los mismos dos puntos, A y B. Se dice que están conectados en paralelo los dispositivos eléctricos que están directamente conectados a los mismos dos puntos de un circuito eléctrico. La ruta para la corriente desde una terminal de la batería hasta la otra se completa sólo si una lámpara está encendida. En esta ilustración, el circuito se rami-SCREENCAST: Bombillas en paralelo

fica en tres rutas distintas de la A a la B. Un rompimiento en una ruta no interrumpe el flujo de carga en las otras rutas. Cada dispositivo funciona de forma independiente de los demás dispositivos.



444

PA R T E C I N CO

F I G U R A 2 3 . 1 8

Circuito en paralelo simple. Una batería

proporciona 6 V a cada lámpara.

Interruptores

A

B

Flujo de

Fuente

electrones

de voltaje

El circuito que se muestra en la Figura 23.18 ilustra las principales características de las conexiones en paralelo:

1. Cada dispositivo se conecta a los mismos dos puntos A y B del circuito. Por tanto, el voltaje es el mismo a través de cada dispositivo.

2. La corriente se divide entre las ramas paralelas. La ley de Ohm se aplica por separado a cada rama.

3. La corriente total del circuito es igual a la suma de las corrientes en sus ramas paralelas. Esta suma es igual a la corriente de la batería u otra fuente de voltaje.

4. A medida que aumenta el número de ramas paralelas, la resistencia global del SCREENCAST: Demostración

de una batería

circuito disminuye. La resistencia global se reduce con cada ruta agregada entre cualesquiera dos puntos del circuito. Esto significa que la resistencia global del circuito es menor que la resistencia de cualquiera de las ramas.

P U N T O D E C O N T R O L

1. En un circuito en paralelo, ¿qué sucede con la corriente en otras lámparas si una de las lámparas se quema?

2. En un circuito en paralelo, ¿qué pasa con el brillo de la luz de cada lám-SCREENCAST: Potencia

para cuando se agregan más lámparas en paralelo?

de una batería

3. ¿Qué ocurre con la corriente de la batería cuando se agregan más lámparas en paralelo?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. Si una de las lámparas se quema, las demás lámparas no son afectadas. Esto se debe a que la corriente en cada rama, de acuerdo con la ley de Ohm, es igual a voltaje/resistencia, y como ningún voltaje ni ninguna resistencia se modifican en las otras ramas, la corriente en dichas ramas no es afectada.

2. El brillo de cada lámpara no cambia cuando se introducen (o se quitan) otras lámparas.

3. La corriente de la batería aumenta por una cantidad que alimenta a cada rama agregada. En el circuito global, las rutas agregadas significan una reducción de la resistencia. (También existe una resistencia en una batería, que aquí se supone despreciable.)

C A PÍ T U LO 23 CO R R I EN T E EL ÉC T R I C A

445

Circuitos en paralelo y sobrecarga

Línea

Línea

La electricidad dentro de una casa por lo general se alimenta mediante dos alambres llamados líneas. Estas líneas, que tienen una resistencia muy baja, se ramifican en circuitos en paralelo que conectan las luces del techo y los tomacorrientes de pared de cada habitación. Las luces y los tomacorrientes se conectan en paralelo,

de modo que a Tostador

todas llega el mismo voltaje, por lo general entre 110-120 V. A medida que se conectan más dispositivos y se encienden, más rutas para la corriente resultan en una reducción 8 A

de la resistencia combinada de cada circuito. En consecuencia, en los circuitos pasa Calefactor

una mayor cantidad de corriente. La suma de estas corrientes es igual a la corriente de línea, que puede rebasar los límites de seguridad. Se dice entonces que el circuito está 10 A

sobrecargado.

Puedes ver cómo ocurre la sobrecarga si consideras el circuito de la Figura 23.19. La Lámpara

línea de suministro está conectada en paralelo a un tostador eléctrico que extrae 8 A, a un calefactor eléctrico que extrae 10 A y a una lámpara eléctrica que extrae 2 A. Cuando 2 A

sólo funciona el tostador y extrae 8 A, la corriente de línea total es de 8 A. Cuando el Fusible

calefactor también opera, la corriente de línea total aumenta a 18 A (8 A hacia el tostador y 10 A hacia el calefactor). Si enciendes la lámpara, la corriente de línea aumenta a 20 A. Conectar más dispositivos aumenta la corriente todavía más. Conectar dema-Hacia la

siados dispositivos en el mismo circuito sobrecalienta los alambres que alimentan el 20 A

compañía

circuito, lo que puede provocar un incendio.

eléctrica

Fusibles de seguridad

F I G U R A 2 3 . 1 9

Diagrama de un circuito para los elec-

Para evitar la sobrecarga de los circuitos, pueden conectarse fusibles

en serie a lo largo trodomésticos conectados a un circuito de la línea de suministro. De esta forma, toda la corriente de la línea debe pasar por doméstico.

el fusible. El fusible que se muestra en la Figura 23.20 está construido con un listón de alambre que se calentará y fundirá a una corriente determinada. Si el fusible está clasificado en 20 A, pasará 20 A pero no más. Una corriente mayor que 20 A fundirá el fusible, que se "apagará" y romperá el circuito. Antes de sustituir un fusible quemado, debes determinar y solucionar la causa de la sobrecarga. Con frecuencia, el aislamiento Corriente

que separa a los alambres en un circuito se corroe y permite que los alambres se toquen.

Listón

Hacia

Esto reduce mucho la resistencia en el circuito, lo que acorta efectivamente la ruta del del fusible

el circuito

circuito, y se llama cortocircuito.

F I G U R A 2 3 . 2 0

En las construcciones modernas, los fusibles se han sustituido por disyuntores (in- Fusible de seguridad.

terruptor automático), que utilizan imanes o tiras bimetálicas para abrir un interruptor cuando la corriente es muy grande. Las compañías eléctricas usan disyuntores para proteger sus líneas durante todo el recorrido de vuelta hasta los generadores.

SCREENCAST: Combinación

de circuitos

F I G U R A 2 3 . 2 1

El electricista Dave Hewitt muestra un

fusible de seguridad y un disyuntor. Él

prefiere los antiguos fusibles, que consi-

dera más confiables.

446

PA R T E C I N CO

EL EC T R I CI DA D Y M AG N E T I SM O

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)

Diferencia de potencial. Diferencia en el potencial eléctrico entre dos puntos, medida en volts (sinónimo de diferencia de voltaje o simplemente voltaje).

Corriente eléctrica. Flujo de carga eléctrica que transporta energía de un lugar a otro, medida en amperes, donde 1 A es por segundo.

Resistencia eléctrica. Propiedad de un material que resiste la corriente eléctrica, medida en ohms (Ω).

Ley de Ohm. Enunciado que establece que la corriente en un circuito varía en proporción directa a la diferencia de potencia corriente voltaje

Potencia eléctrica. Tasa de transferencia de energía o tasa de realización de trabajo; es la cantidad de energía por unidad de tiempo, que puede calcularse como el producto de la corriente y el voltaje:

La potencia eléctrica se mide en watts (o kilowatts), donde

Corriente alterna (CA). Partículas con carga eléctrica que invierten su dirección en forma repetida y vibran en torno a posiciones relativamente fijas. En Estados Unidos, la tasa de vibración por lo general es de 60 Hz.

Potencia eléctrica. Tasa de transferencia de energía o tasa de el flujo de 6.25 3 1018 electrones por segundo, o 1 coulomb

po tencial o voltaje en el circuito, y en proporción inversa a la

1 W 5 1 A 3 1 V 5 1 J/s.

resistencia del circuito:

Circuito en serie. Circuito eléctrico en el cual los dispositivos voltaje

eléctricos están conectados a lo largo de una sola trayectoria

Corriente =

de alambre, de modo que en cada dispositivo pasa la misma

resistencia

corriente.

Una diferencia de potencial de 1 V a través de una resisten-

Circuito en paralelo. Circuito eléctrico en el cual los dispositi-cia de 1 Ω produce una corriente de 1 A.

vos eléctricos están conectados de tal forma que el mismo vol-

Corriente directa (CD). Partículas con carga eléctrica que flu-taje actúa a través de cada uno, y cualquiera de el os completa

yen sólo en una dirección.

el circuito de manera independiente de todos los demás.

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N) 23.1 Flujo de carga y corriente eléctrica

12. Si la resistencia de un circuito permanece constante

1. ¿Qué condición es necesaria para el flujo de calor? ¿Qué

mientras el voltaje en el circuito disminuye a la mitad de

condición análoga es necesaria para el flujo de carga?

su valor anterior, ¿qué cambio ocurre en la corriente?

2. ¿Qué condición es necesaria para el flujo sostenido de

13. ¿Cómo es que la humedad afecta la resistencia de tu cuerpo?

agua en una tubería? ¿Qué condición análoga es necesaria

14. ¿Cuál es la función de la tercera pata redonda en un

para el flujo sostenido de carga en un alambre?

moderno enchufe eléctrico doméstico?

3. ¿Por qué los electrones, y no los protones, son los principa-23.5 Corriente directa y corriente alterna

les portadores de carga en los alambres metálicos?

15. ¿Una batería produce CD o CA? ¿El generador de una

4. ¿Qué es exactamente un ampere?

central eléctrica produce CD o CA?

23.2 Fuentes de voltaje

16. ¿Qué quiere decir que una corriente determinada es de 60 Hz?

5. Menciona dos tipos de "bombas eléctricas" prácticas.

17. ¿Qué propiedad de un diodo le permite convertir CA a

6. ¿Cuánta energía se suministra a cada coulomb de carga

CD pulsátil?

que fluye por una batería de 12 V?

18. Un diodo convierte CA en CD pulsátil. ¿Qué dispositivo

7. ¿La carga eléctrica fluye dentro de un circuito o a través eléctrico regula la CD pulsátil en una CD más regulada?

de un circuito? ¿El voltaje fluye dentro de un circuito o se

23.6 Rapidez y fuente de los electrones

establece en un circuito?

en un circuito

23.3 Resistencia eléctrica

19. ¿Cuál es el error cuando se dice que los electrones en un

8. ¿El agua fluirá con más facilidad a través de una tubería ancha

circuito común operado por baterías viajan aproximada-

o de una tubería estrecha? ¿La corriente fluirá con más facili-

mente a la rapidez de la luz?

dad a través de un alambre grueso o de un alambre delgado?

20. ¿Por qué se calienta un alambre que porta corriente

9. ¿Calentar un alambre metálico aumenta o disminuye su

eléctrica?

resistencia eléctrica?

21. ¿Qué se entiende por velocidad de deriva?

10. ¿Cuál es la unidad de resistencia eléctrica?

22. Una ficha de dominó inclinada envía un pulso a lo largo

de una fila de fichas de dominó que están de pie. ¿Ésta es

23.4 La ley de Ohm

una buena analogía de la forma en que viaja la corriente

11. Si el voltaje establecido en un circuito se mantiene cons-

eléctrica, el sonido o ambas?

tante mientras la resistencia se duplica, ¿qué cambio ocu-

23. ¿Cuál es el error cuando se dice que la fuente de los elec-

rre en la corriente?

trones en un circuito es la batería o el generador?

C A PÍ T U LO 23 R E V ISI Ó N

24. Cuando realizas el pago de tu factura por el consumo

23.9 Circuitos eléctricos

eléctrico doméstico al final del mes, ¿por cuál te cobran:

29. En un circuito de dos lámparas en serie, si la corriente a tra-

voltaje, corriente, potencia o energía?

vés de una lámpara es de 1 A, ¿cuál es la corriente a través de

25. ¿Dónde se originan los electrones que producen un

la otra lámpara? Defiende tu respuesta.

choque eléctrico cuando tocas un conductor cargado?

30. Si un voltaje de 6 V se establece dentro del circuito de

23.7 Potencia eléctrica

la pregunta anterior y el voltaje dentro de la primera

lámpara es de 2 V, ¿cuál es el voltaje dentro de la segunda

26. ¿Cuál es la relación entre la potencia eléctrica, la corriente

lámpara? Defiende tu respuesta.

y el voltaje?

31. En un circuito de dos lámparas en paralelo, si existe un

27. ¿Cuál de éstos es una unidad de potencia y cuál es una

voltaje de 6 V dentro de una lámpara, ¿cuál es el voltaje

unidad de energía: watt, kilowatt, kilowatt-hora?

dentro de la otra lámpara?

23.8 Lámparas

32. ¿Cuál es la diferencia entre la suma de las corrientes que

28. ¿Cómo es que el calor emitido por las lámparas afecta su

pasan por las ramas de un circuito en paralelo simple y la

eficiencia?

corriente en la fuente de voltaje?

33. ¿Cuál es la función de los fusibles o disyuntores en un

circuito?

P I E N S A Y R E A L I Z A (A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 34. *Para hacer una celda eléctrica se colocan dos placas de*

corriente eléctrica entra a tu casa. Cuanta más corriente

diferentes materiales que tengan diferentes afinidades

eléctrica, más rápido gira el disco. La rapidez del disco

para los electrones, en una solución conductora. El voltaje

es directamente proporcional al número de watts usados;

de una celda depende de los materiales utilizados y de

por ejemplo, gira 5 veces más rápido para 500 W que

las soluciones en donde se colocan, no del tamaño de las

para 100 W.

placas. (Con frecuencia, a una celda se le llama batería, pero

Puedes usar el medidor para determinar cuántos watts

estrictamente hablando, una batería es una serie de celdas;

utiliza un aparato eléctrico. Primero, asegúrate de que todos

por ejemplo, seis celdas en una batería automotriz de 12 V.)

los aparatos eléctricos de tu casa estén desconectados (está bien

Tú puedes fabricar una celda simple de 1.5 V si colocas una

ignorar los relojes eléctricos y otros aparatos de 2 W, los cuales

tira de cobre y una tira de cinc en un vaso con agua salada.

difícilmente serán apreciables). El disco estará prácticamente

Una celda sencil a de construir es la celda cítrica. Pega

estacionario. Luego conecta una bombil a de 100 W y observa

un clip estirado y un trozo de alambre de cobre en un limón.

cuántos segundos tarda el disco en dar cinco revoluciones

Mantén los extremos del alambre juntos, más no en con-

completas. La mancha negra pintada sobre el borde del disco

tacto, y coloca los extremos sobre tu lengua. El leve hormi-

facilita esto. Desconecta la bombil a de 100 W y conecta un

gueo que sientes y el gusto metá-

aparato con vataje desconocido. De nuevo, cuenta los segundos

lico que experimentas resultan de

Clip

para cinco revoluciones. Si tarda el mismo tiempo, es un

una ligera corriente eléctrica pro-

aparato de 100 W; si tarda el doble de tiempo, es un aparato

veniente de la celda cítrica a través

Limón

de 50 W; la mitad del tiempo, un aparato de 200 W; y así

de los alambres cuando tu lengua

sucesivamente. De esta forma puedes calcular el consumo de

húmeda cierra el circuito.

Alambre de cobre

potencia de los aparatos con bastante exactitud.

35. Examina el medidor eléctrico de tu casa. Es probable que

36. Envía una carta a la abuela y convéncela de que cualquier

esté en el sótano o afuera de tu casa. Verás que, además de

choque eléctrico que haya podido recibir durante su vida

los diales parecidos a relojes del medidor, hay un disco

se debió al movimiento de electrones que ya estaban en su

de aluminio que gira entre los polos de imanes cuando la

cuerpo, no a electrones provenientes de alguna otra parte.

S U S T I T U Y E Y L I S T O (F A M I L I A R I Z A C I Ó N C O N E C U A C I O N E S) V

39. Calcula la corriente en el filamento de 240 V de una

Ley de Ohm: $I = R$

bombilla conectada a una línea de 120 V.

37. Un tostador tiene un elemento calefactor de 15 Ω y se

Potencia 5 I 3 V

conecta a un tomacorriente de 120 V. Demuestra que

la corriente extraída por el tostador es de 8 A.

40. Un juguete eléctrico extrae 0.5 A de un tomacorriente de

38. Cuando tus dedos (resistencia 1,000 Ω) tocan las termi-

120 V. Demuestra que el juguete consume 60 W de potencia.

nales de una batería de 6 V, demuestra que la pequeña

41. Calcula la potencia de una secadora de cabello que opera

corriente que se mueve por tus dedos es de 0.006 A.

en 120 V y extrae una corriente de 10 A.

PA R T E C I N CO

EL EC T R I CI DA D Y M AG N E T I SM O

P I E N S A Y R E S U E L V E (A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 42. ¿Cuál es el efecto sobre la corriente en un alambre, si

47. Demuestra que hacer funcionar una lámpara de 100 W de

tanto el voltaje en él como su resistencia se duplican?

manera continua durante 1 semana, cuando la tarifa de la

¿Si ambos se reducen a la mitad?

compañía eléctrica es de 15¢/kWh, cuesta $2.52.

43. El vataje marcado en una bombilla no es una propiedad

48. Una lamparilla de 4 W se conecta en un circuito de

inherente de la bombilla, sino que depende del voltaje al

120 V y funciona de manera continua durante 1 año.

cual se conecta, por lo general 110 V o 120 V. ¿Cuántos

Encuentra lo siguiente: (a) la corriente que extrae,

amperes fluyen por una bombilla de 60 W conectada a

(b) la resistencia de su filamento, (c) la energía consumida

un circuito de 120 V?

en un año. (d) Luego demuestra que, para una tarifa de

44. Reordena la ecuación corriente 5 voltaje/resistencia para

15¢/kWh, el costo para un año de operación es de $5.25.

expresar la resistencia en términos de la corriente y el

49. Una plancha eléctrica conectada a una fuente de 100 V

voltaje. Luego resuelve lo siguiente: por cierto aparato en

extrae 9 A de corriente. Demuestra que la cantidad de

un circuito de 120 V pasa una corriente de 20 A. ¿Cuál es

calor que genera en un minuto es de casi 60,000 J.

la resistencia del aparato (cuántos ohms)?

50. Demuestra en el problema anterior que 540 C de carga

45. Con la fórmula potencia 5 corriente 3 voltaje, encuentra la

fluyen por la plancha en 1 minuto.

corriente extraída por un tostador de 1,200 W conectado a

51. En periodos de máxima demanda, las compañías eléctricas

120 V. Luego, con el método del problema anterior, demues-

reducen su voltaje. Esto les ahorra potencia (¡y dinero!). Para

tra que la resistencia del tostador es 12 V.

ver el efecto, piensa en una cafetera de 1,200 W que extrae 10

46. La carga total que la batería de un automóvil puede sumi-

A cuando se conecta a 120 V. Supón que el voltaje se reduce en

nistrar sin recargarse está dada en términos de ampere-

10% a 108 V. ¿En cuánto disminuye la corriente? ¿En cuánto

horas. Una batería común de 12 V tiene una clasificación

disminuye la potencia? (Precaución: la etiqueta de 1,200 W

de 60 ampere-horas (60 A por 1 h, 30 A por 2 h, y así

sólo es válida cuando se aplican 120 V. Cuando el voltaje se

sucesivamente). Supón que olvidas apagar los faros de tu

reduce, la corriente se reduce, de modo que baja la potencia de

automóvil luego de estacionarlo. Si cada uno de los dos

salida de las bobinas calefactoras de la cafetera, lo cual enfría

faros extrae 3 A, ¿cuánto tiempo transcurrirá antes de

la bobina y baja su resistencia. Sin embargo, para este proble-

que tu batería "se muera"?

ma supón que el cambio de resistencia es moderado.)

P I E N S A Y C L A S I F I C A (A N Á L I S I S)

52. Clasifica los circuitos ilustrados de acuerdo con el brillo de las bombillas idénticas, de la más brillante a la menos brillante.

A

B

C

53. Las bombillas que se muestran son idénticas. Un

A

B

C

amperímetro se coloca en diferentes lugares, como

55. Todas las bombillas son idénticas en los circuitos mos-

se muestra. Clasifica las lecturas de corriente en el

trados. Un voltímetro se conecta a través de una sola

amperímetro, de mayor a menor.

bom billa para medir la caída de voltaje a través de ella.

Clasifica las lecturas de voltaje de mayor a menor.

A

B

C

A

B

C

56. Considera las tres partes del circuito: A,

54. Todas las bombillas son idénticas en los circuitos

la rama superior con dos bombillas; B, la

mostrados. Un amperímetro se conecta junto a la batería,

rama de en medio con una bombilla; C,

como se muestra. Clasifica las lecturas de corriente en el

la batería.

amperímetro, de mayor a menor.

a. Clasifica las corrientes a través de cada una,

de mayor a menor.

b. Clasifica los voltajes en cada una, de mayor

a menor.

C A PÍ T U LO 23 R E V ISI Ó N

449

P I E N S A Y E X P L I C A (S Í N T E S I S)

57. ¿Qué condición es necesaria para tener un flujo sostenido

está demasiado "débil" como para arrancar el automóvil.

de carga eléctrica a través de un medio conductor?

Un amigo arranca en frío tu automóvil con su batería y

58. ¿Cuáles dos cosas pueden hacerse para aumentar la can-

cables para batería. ¿Qué física ocurre aquí?

tidad de flujo en una tubería de agua? De igual modo,

72. Tu amigo dice que, cuando arranques en frío una batería

¿cuáles dos cosas pueden hacerse para aumentar la

muerta, debes conectar tu batería viva en paralelo con

corriente en un circuito eléctrico?

la batería muerta, lo cual, en efecto, reemplaza la batería

59. Considera una tubería de agua que se ramifica en dos

muerta. ¿Estás de acuerdo?

tuberías más pequeñas. Si el flujo de agua es de 10 galo-

73. Un electrón que se mueve en un alambre choca en repe-

nes por minuto en la tubería principal y de 4 galones por
tidas ocasiones con los átomos y recorre una distancia
minuto en una de las ramas, ¿cuánta agua por minuto
promedio entre colisiones llamada trayectoria libre media.
fluye en la otra rama?
Si la trayectoria libre media es menor en algunos metales,
60. Considera un circuito con un alambre principal que se
¿qué puedes decir acerca de la resistencia de dichos meta-
ramifica en otros dos alambres. Si la corriente es de 10 A en
les? Para un conductor dado, ¿qué puede hacerse para
el alambre principal y de 4 A en una de las ramas, ¿cuánta
alargar la trayectoria libre media?
corriente hay en la otra rama?
74. ¿Por qué la corriente en una bombilla incandescente es
61. Un ejemplo de sistema hidráulico es una manguera de jardín
mayor inmediatamente después de que se enciende que
que riega un jardín. Otro es el sistema de enfriamiento de
algunos momentos después? (Es por eso que las bombillas
un automóvil. ¿Cuál de estos sistemas muestra un comporta-
suelen quemarse justo cuando se encienden.)
miento más análogo con un circuito eléctrico? Explica.
75. Sólo un pequeño porcentaje de la energía eléctrica que
62. ¿Qué ocurre con el brillo de la luz emitida por una
alimenta una bombilla común se transforma en luz. ¿Qué

bombilla cuando la corriente que fluye por ella aumenta?

ocurre con la energía restante?

63. En la figura se muestra el circuito en el interior de una

76. ¿Por qué todas las lámparas fluorescentes compactas son

lámpara incandescente. ¿Cuál de los arreglos de la batería

más eficientes que las lámparas incandescentes?

iluminará la lámpara?

77. ¿Por qué para transportar grandes corrientes generalmen-

te se utilizan alambres gruesos en lugar de delgados?

78. ¿Por qué el filamento de una bombilla brilla, pero los

alambres conectores no brillan?

79. ¿Una lámpara con un filamento grueso extraerá más

corriente o menos corriente que una lámpara con un fila-

mento delgado?

64. Tu amigo dice que una batería proporciona los electrones

en un circuito eléctrico. ¿Estás de acuerdo o en desacuer-

80. ¿Qué causa un choque eléctrico: la corriente o el voltaje?

do? Defiende tu respuesta.

81. Si una corriente de uno o dos décimos de ampere fluyera

65. ¿Cuánta energía se suministra a cada coulomb de carga

hacia una de tus manos y saliera por la otra, probable-

que pasa a través de una batería de 6 V?

mente te electrocutarías. Pero si la misma corriente fluye-

ra hacia tu mano y saliera por el codo de la misma mano,

66. ¿Un alambre portador de corriente está eléctricamente

sobrevivirías aun cuando la corriente fuera tan grande

cargado debido a los electrones que se mueven en él?

como para quemar tu piel. Explica.

67. Tu tutor te dice que un ampere y un volt miden en rea-82. ¿Esperarías encontrar CD o CA en el filamento de una

lidad la misma cosa y que la diferencia de términos sólo

bombilla en tu casa? ¿En los faros de un automóvil?

sirve para hacer que un concepto sencillo parezca con-

fuso. ¿Por qué debes pensar en conseguirte otro tutor?

83. ¿Los faros de los automóviles están alambrados en

paralelo o en serie? ¿Cuál es tu evidencia?

68. ¿En cuál de los circuitos mostrados existe una corriente

para iluminar la bombilla?

84. A medida que se abren más filas en un restaurante de

comida rápida, la resistencia al movimiento de las perso-

nas que intentan conseguir servicio se reduce. ¿En qué se

parece esto a lo que ocurre cuando se agregan más ramas

a un circuito en paralelo?

1

2

3

4

5

85. ¿Qué unidad significa (a) joule por coulomb,

69. ¿Fluye más corriente hacia fuera de una batería que hacia

(b) coulomb por segundo, (c) watt?segundo?

dentro de ella? ¿Fluye más corriente hacia dentro de una

86. ¿Qué es igual para un resistor de 10 V y uno de 20 V en

bombilla que hacia fuera de ella? Explica.

serie en un circuito: la corriente o el voltaje?

70. Algo se "agota" en una batería que con el tiempo muere y

87. ¿Qué es igual para un resistor de 10 V y uno de 20 V en

ya no sirve. Un amigo dice que la corriente se agota. Otro

paralelo en un circuito: la corriente o el voltaje?

amigo dice que la energía se agota. ¿Con quién, si alguno,

88. Los efectos dañinos del choque eléctrico se deben a la

estás de acuerdo y por qué?

cantidad de corriente que fluye en el cuerpo. ¿Por qué,

71. Supón que dejas encendidas las luces de tu automóvil

entonces, uno ve señales donde se advierte "Peligro: Alto

mientras ves una película. Cuando regresas, la batería

voltaje", en lugar de "Peligro: Alta corriente"?

PA R T E C I N CO

EL EC T R I CI DA D Y M AG N E T I SM O

89. Comenta sobre la señal de advertencia que se muestra en

corriente? ¿Qué ocurrirá si la bombilla A se desenrosca?

el dibujo.

¿Si la bombilla C se desenrosca?

¡PELIGRO!

ALTA RESISTENCIA

A

B

90. ¿La siguiente etiqueta en un producto doméstico debe causar

C

preocupación? “Precaución: Este producto contiene peque-

ñas partículas con carga eléctrica que se mueven con rapide-

ces que superan los 100,000,000 kilómetros por hora”.

100. Conforme cada vez más bombil as se conectan en serie a

una batería de linterna, ¿qué ocurre con el bril o de cada

bombil a? Si supones que el calentamiento dentro de la bate-

ría es despreciable, ¿qué ocurre con el bril o de cada bombi-

l a cuando cada vez más bombil as se conectan en paralelo?

101. ¿Qué cambios ocurren en la corriente de línea cuando

se introducen más dispositivos en un circuito en serie?

91. ¿Qué provocará menos daño: conectar una secadora de

¿En un circuito en paralelo? ¿Por qué tus respuestas son

cabello de 100 V en un circuito de 220 V, o conectar una

diferentes?

secadora de cabello de 220 V en un circuito de 110 V?

102. ¿Por qué no hay efectos en otras ramas en un circuito en

Defiende tu respuesta.

paralelo cuando una rama del circuito se abre o se cierra?

92. ¿Por qué debe considerarse la envergadura de las aves

103. Cuando un par de resistores idénticos se conectan en

cuando se determina el espaciamiento entre los alambres

serie, ¿cuál de los siguientes es igual para ambos resis-

paralelos de una línea de transmisión eléctrica?

tores: (a) el voltaje a través de cada uno, (b) la potencia

93. Estima el número de electrones que una compañía eléctri-

disipada por cada uno, (c) la corriente a través de cada

ca suministra anualmente a los hogares de una ciudad

uno? ¿Alguna de tus respuestas cambia si los resistores

típica de 40,000 personas.

son diferentes entre ellos?

94. Si los electrones fluyen con mucha lentitud por un

104. Cuando dos resistores idénticos se conectan en paralelo,

circuito, ¿por qué no transcurre un tiempo conside-

¿cuál de los siguientes es igual para ambos resistores:

rablemente largo para que una lámpara brille cuando

(a) el voltaje a través de cada uno, (b) la potencia disipa-

enciendes un interruptor distante?

da por cada uno, (c) la corriente a través de cada uno?

95. ¿Por qué la rapidez de una señal eléctrica es mucho

¿Alguna de tus respuestas cambia si los resistores son

mayor que la rapidez del sonido?

diferentes entre sí?

96. Considera un par de bombillas de linterna conectadas a

105. Las baterías tienen una resistencia interna, la cual no

una batería. ¿Brillarán más si se conectan en serie o en

siempre es despreciable. Se muestra cuando la corriente

paralelo? ¿La batería se agotará más rápido si las bombi-

que suministra una batería aumenta, con lo cual el volta-

llas se conectan en serie o en paralelo?

je que suministra disminuye. Tomando en consideración

97. ¿Qué ocurre con el brillo de la bombilla A cuando el

la resistencia interna de la batería, ¿el brillo de muchas

interruptor se cierra y la bombilla B se enciende?

bombillas disminuirá cuando se conecten en paralelo?

Defiende tu respuesta.

A

106. ¿Estos tres circuitos son equivalentes? ¿Por qué sí o por

qué no?

B

98. Si varias bombillas se conectan en serie a una batería,

pueden sentirse calientes al tacto, pero no visiblemente

107. La Figura 23.19 muestra un fusible colocado en un cir-

brillantes. ¿Cuál es tu explicación?

cuito doméstico. ¿En qué otras ubicaciones de este circui-

99. En el circuito mostrado, ¿cómo se compara el brillo

to podría colocarse un fusible para que sea útil y sólo se de las bombillas idénticas? ¿Cuál bombilla extrae más funda si surge un problema?

C A PÍ T U LO 23 R E V ISI Ó N

451

P I E N S A Y D I S C U T E (E V A L U A C I Ó N)

108. Un detector de mentiras simple consiste en un circuito

118. ¿La resistencia de una bombilla de 100 W es mayor o

eléctrico que va generalmente de un dedo a otro. Un

menor que la resistencia de una bombilla de 60 W? Si

medidor sensible muestra la corriente que fluye cuando se

supones que los filamentos en cada bombilla tienen igual

aplica un pequeño voltaje. ¿Cómo esta técnica indica que

longitud y están hechos del mismo material, ¿cuál bom-

una persona miente? (¿Y cuándo esta técnica no indica

billa tiene el filamento más grueso?

si una persona miente?)

119. Si una bombilla de 60 W y una bombilla de 100 W se

109. Suele decirse que determinado resistor extrae cierta

conectan en serie en un circuito, ¿a través de cuál bom-

corriente. ¿Esto significa que el resistor "atrae" la corrien-

billa habrá mayor caída de voltaje? ¿Y si se conectan en

te? Defiende tu respuesta.

paralelo?

110. Los faros de un automóvil disipan 40 W en luz baja y

120. (a) ¿Qué resistor sería equivalente a los resistores en este

50 W en luz alta. ¿En el filamento de una luz alta hay

arreglo? (b) Si a través de los puntos A y B se aplican 24

más o menos resistencia?

volts, ¿cuánta corriente habría en el circuito? (c) ¿Cuánta

111. Para conectar un par de resistores, de modo que su resisten-

corriente habrá en el resistor de 12 ohm?

cia combinada (equivalente) sea mayor que la resistencia de

cualquiera de el os, ¿debes conectarlos en serie o en paralelo?

6

6

112. Para conectar un par de resistores de modo que su resisten-

cia combinada (equivalente) sea menor que la resistencia de

12

cualquiera de el os, ¿debes conectarlos en serie o en paralelo?

A

B

113. Si una bombilla incandescente que brilla se raja y le entra

oxígeno, la bombilla momentáneamente brillará más

antes de quemarse. Poner una corriente excesiva a través

6

6

de la bombilla también la quemará. ¿Qué cambio físico

ocurre cuando se quema una bombilla?

114. Tu amigo dice que la resistencia equivalente (combinada)

121. Tres resistores de 6 ohm están

de resistores conectados en serie siempre es mayor que la

or denados en un triángulo, como

6

6

resistencia del resistor más grande. ¿Estás de acuerdo?

se muestra. Una fuente de voltaje de

115. Tu amigo dice que la resistencia equivalente (combinada)

12 V se conecta a través de uno

de resistores conectados en paralelo siempre es menor

de los resistores.

6

que la resistencia del resistor más pequeño. ¿Estás de

a. ¿Cuánta corriente hay en dicho

acuerdo?

resistor?

116. Tu amigo experto en electrónica necesita un resistor de

b. ¿Cuánta corriente hay en cada uno de los otros dos

20 V, pero sólo tiene resistores de 40 V. Te dice que puede

resistores?

combinarlos para producir un resistor de 20 V. ¿Cómo?

c. ¿Cuánta corriente hay en la fuente de voltaje?

117. Tu amigo experto en electrónica necesita un resistor de

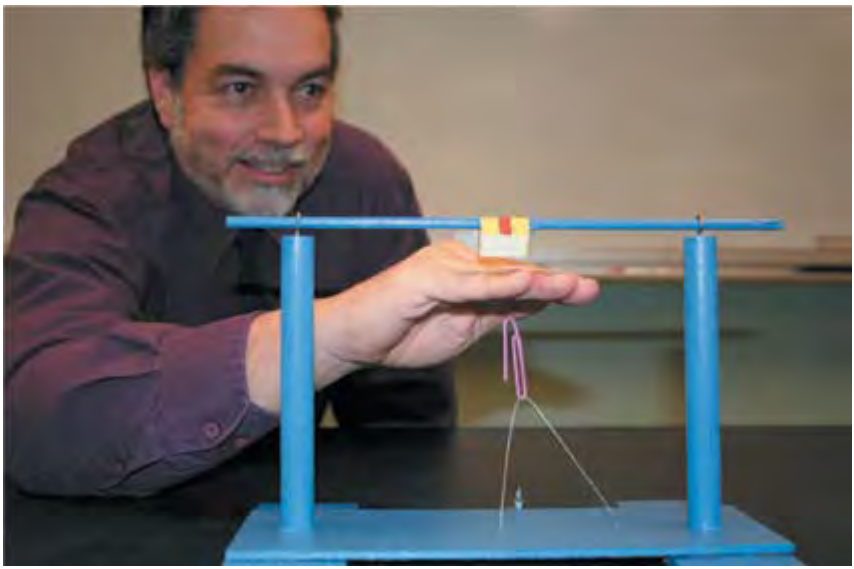
d. ¿Cuál es la resistencia equivalente del circuito (qué

10 V, pero sólo tiene de 40 V. ¿Cómo puede combinar-

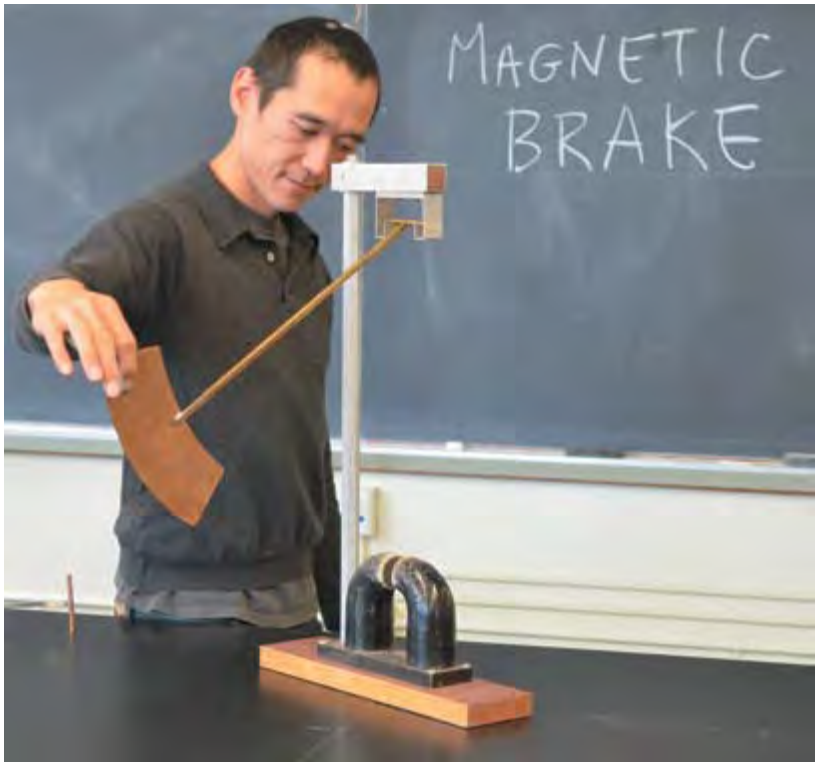
resistor individual, conectado a la fuente de voltaje,

los para producir una resistencia equivalente de 10 V?

podría sustituir a los tres resistores)?



F = qVB


MAGNETIC
BRAKE

24 1

C A P Í T U L O 2 4

Magnetismo

2

24.1 Magnetismo

3

24.2 Polos magnéticos

24.3 Campos magnéticos

24.4 Dominios magnéticos

24.5 Corrientes eléctricas y campos magnéticos

24.6 Electroimanes

24.7 Fuerzas magnéticas

24.8 El campo magnético de la Tierra

24.9 Biomagnetismo

4

1 Fred Myers muestra que el campo magnético de un imán

cerámico penetra su cuerpo y el recubrimiento plástico de un clip.

2 Ken Ganezer muestra el brillo azul-verdoso de los electrones que dan vueltas en las líneas de campo magnético en el interior

de un tubo Thomson. 3 Cuando Fred Cauthen suelta la hoja de

cobre, ¿por qué se detiene cuando comienza a balancearse entre

los polos magnéticos? 4 William Davis, como la mayoría de los niños, está fascinado con los imanes.

En la época en la que el aceite de ballenas se utilizaba Entonces estuvo cavando zanjas durante poco tiempo, iró-para encender lámparas y la iluminación eléctrica

nicamente, para la compañía de Edison.

hacía su debut, una pregunta apremiante era cuál

La principal disputa entre Tesla y Edison fue acerca de si

forma de energía alimentaría la iluminación eléctrica. la potencia eléctrica debía transportarse mediante corrien-La persona que respondió mejor dicha pregunta fue Niko-

te directa o corriente alterna. Edison defendía la corriente

la Tesla, un serbio que emigró

directa, que no se transportaba bien a través de largas dis-

a Estados Unidos procedente tancias. La corriente alterna de Tesla sí lo hacía. Edison se del imperio austriaco en 1884.

puso furioso con Tesla y emprendió una enérgica campaña

Tesla, ingeniero eléctrico, en contra de la corriente alterna de Tesla. Los dos siguieron fue un inventor prolífico y un

siendo acérrimos adversarios a lo largo de sus vidas. Pero

genio que hablaba siete idio-

Tesla prevaleció y formó su propia compañía, que condujo

mas. Cuando llegó a Estados a muchas patentes que ayudaron a dotar de electricidad a Unidos no tenía más que una

ciudades e industrias modernas. Tesla fue homenajeado en

carta de recomendación de su

reiteradas ocasiones y se le alabó como el santo patrono de

exempleador, dirigida a Tho-

la electricidad moderna.

mas Edison. La carta era breve:

En 1888 Tesla formó equipo con George Westinghouse,

“Conozco dos grandes hombres, uno es usted y el otro es

y juntos aprovecharon la energía de las Cataratas del Niága-

este joven”. Edison contrató a Tesla para que trabajara en

ra para alumbrar la ciudad cercana de Buffalo. Para enviar

su empresa Edison Machine Works. Tesla pronto se dedicó

la electricidad a través de distancias más grandes, Westing-

a resolver los problemas más difíciles de la compañía. Tra-

house perfeccionó un dispositivo llamado transformador

bajó día y noche en el rediseño de los ineficaces motores y

(consulta el Capítulo 25). La potencia de las Cataratas del

generadores de Edison pensando en la espléndida bonifica-

Niágara pronto llegó a la ciudad de Nueva York y más lejos.

ción que le habían prometido si lograba buenos resultados.

Los esfuerzos de Tesla y Westinghouse en verdad ilumina-

Cuando la bonificación no se materializó, Tesla renunció.

ron el mundo.

24.1 Magnetismo

A los niños les fascinan los imanes, principalmente porque actúan a distancia. Incluso cuando tu mano se interpone entre ellos, actúan a distancia como lo muestra Fred Myers en la primera de las fotografías con las que inicia el capítulo. Del mismo modo, VIDEO: El descubrimiento de Oersted un neurocirujano puede guiar un perdigón por el tejido cerebral hasta tumores inoperables, colocar un catéter en su posición o implantar electrodos sin causar casi ningún daño al tejido cerebral. El uso de los imanes crece día con día.

El término magnetismo proviene del nombre Magnesia, un distrito costero de la antigua Tesalia, en Grecia, donde los griegos encontraron piedras extrañas hace más de 2,000 años. Estas piedras, llamadas magnetitas, tienen la asombrosa propiedad de atraer pedazos de hierro. Con los imanes se fabricaron primero brújulas, que los chinos utilizaban para navegar en el siglo XII.

En el siglo XVI, William Gilbert, médico de la reina Isabel, fabricó imanes artificiales al frotar pedazos de hierro contra magnetitas, y sugirió que una brújula siempre apuntaba al norte y al sur porque la Tierra tenía propiedades magnéticas.

Después, en 1750, John Michell, físico y astrónomo inglés, descubrió que las fuerzas magnéticas disminuían con la distancia respecto de la fuente magnética, y sus resultados fueron confirmados por Charles Coulomb. Los temas de magnetismo y Se dicen muchas mentiras sobre el

electricidad se desarrollaron casi independientemente uno del otro hasta 1820, cuan-magnetismo, de ahí la necesidad

de un filtro de conocimiento que

do un físico danés llamado Hans Christian Oersted descubrió, en una demostración indique la diferencia entre lo

en su salón de clase, que una corriente eléctrica afecta una brújula magnética.1 Tam-que es cierto y lo que no lo es. El

bién observó evidencia confirmadora de que el magnetismo se relacionaba con la mejor filtro de conocimiento jamás

electricidad. Poco tiempo después, el físico francés Andre Marie Ampere propuso inventado es la ciencia.

que las corrientes eléctricas eran la fuente de todos los fenómenos magnéticos.

1Uno sólo puede especular sobre la frecuencia con que tales relaciones se vuelven evidentes cuando "se supone que no deben ocurrir" y se descartan como "algo anda mal con el aparato". Sin embargo, Oersted tuvo la intuición —característica de un buen científico— para ver que la naturaleza revelaba otro de sus secretos.

PA R T E C I N CO

EL EC T R I CI DA D Y M AG N E T I SM O

En el Capítulo 22 se estudiaron las fuerzas que las partículas con carga eléctrica ejercen unas sobre otras: la fuerza entre cualesquiera dos partículas cargadas depende de la magnitud de la carga sobre cada una y de su distancia de separación, como lo especifica la ley de Coulomb. Pero la ley de Coulomb no es suficiente cuando las partículas cargadas se mueven unas con respecto a otras. La fuerza entre las partícu -

las con carga eléctrica también depende, en una forma complicada, de su movimiento.

Se descubre que, además de la fuerza eléctrica, hay una fuerza debida al movimiento de las partículas cargadas que se llama fuerza magnética. La fuente de la fuerza magnética es el movimiento de las partículas cargadas, generalmente electrones. Las fuerzas eléctrica y magnética en realidad son diferentes aspectos del mismo fenómeno de electromagnetismo.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Las fuerzas eléctricas y las fuerzas magnéticas dependen del movimiento?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Sólo la fuerza magnética necesita movimiento. Sigue leyendo.

24.2 Polos magnéticos

Las fuerzas que ejercen los imanes unos sobre otros son similares a las fuerzas eléctricas, porque ambas pueden atraer y repeler sin tocar, dependiendo de qué extremos de los imanes se mantengan

juntos. También, al igual que las fuerzas eléctricas, la intensidad de su interacción depende de la distancia de separación entre los dos imanes. Mientras que la carga eléctrica es responsable de las fuerzas eléctricas, las regiones llamadas polos magnéticos originan las fuerzas magnéticas.

Si suspendes un imán de barra en su centro con un pedazo de cuerda, tendrás una brújula. Un extremo, llamado polo que busca el norte, apunta al norte, y el extremo opuesto, llamado polo que busca el sur, apunta al sur. Dicho de un modo más sencillo, N

S

se les llama polos norte y sur. Todos los imanes tienen tanto polo norte como polo sur (algunos tienen más de uno de ellos). Los imanes del refrigerador, populares en años recientes, tienen tiras delgadas de polos norte y sur alternados. Estos imanes son tan potentes que sostienen hojas de papel contra la puerta del refrigerador, pero tienen un alcance muy corto porque los polos norte y sur están juntos y se cancelan a distancias cortas. En un imán de barra simple, un solo polo norte y un solo polo sur se ubican en extremos opuestos. Un imán de herradura común es tan sólo un imán de barra que F I G U R A 2 4 . 1

se dobló en forma de U. Sus polos también están en sus dos extremos (Figura 24.1).

Un imán de herradura.

Cuando el polo norte de un imán se acerca al polo norte de otro imán, éstos se repelen.2 Lo mismo sucede con un polo sur que se acerca a otro polo sur. Sin embargo, si polos opuestos se acercan, se atraen. Se descubre que:

Polos iguales se repelen; polos opuestos se atraen.

Esta regla es similar a la regla para las fuerzas entre cargas eléctricas, donde cargas iguales se repelen y cargas opuestas se atraen. Pero hay una diferencia muy importante Si los imanes no se pegan a la

entre los polos magnéticos y las cargas eléctricas. Mientras que las cargas eléctricas puerta de acero inoxidable de tu

pueden aislarse, los polos magnéticos no pueden aislarse. Los electrones con carga refrigerador, seguramente la puer-negativa y los

protones con carga positiva son entidades por sí mismas. Un grupo de ta es una mezcla de acero y níquel.

Pero los imanes se pegarán al ace-

electrones no necesita acompañarse de un grupo de protones, ni viceversa. Pero un ro inoxidable cuando esté hecho

polo magnético norte nunca existe sin la presencia de un polo sur, y viceversa.

con cromo en lugar de níquel.

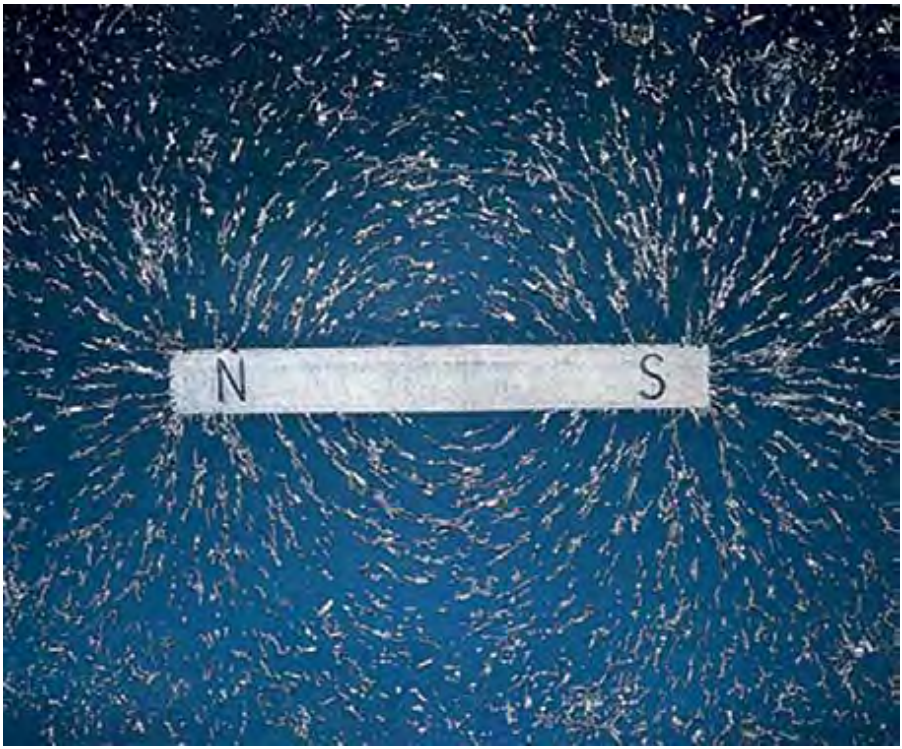
p p

2La fuerza de la interacción entre los polos está dada por F 1 2 , donde p y p representan las intensidades de d 2

1

2

los polos magnéticos y d representa la distancia de separación entre los polos. Observa la semejanza de esta relación con la ley de Coulomb.



C A PÍ T U LO 24 M AG N E T ISM O

455

Si rompes un imán de barra a la mitad, cada mitad todavía actúa como un imán completo. Rompe los trozos de nuevo a la mitad y tendrás cuatro imanes completos.

Puedes seguir rompiendo los trozos a la mitad y nunca aislarás un solo polo.3 Aun cuando el pedazo sea del grosor de un átomo, habrá dos polos, lo cual sugiere que los átomos en sí mismos son imanes.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Todo imán necesariamente tiene un polo norte y uno sur?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Sí, así como toda moneda tiene dos lados, una "cara" y una "cruz". Algunos imanes

"de truco" tienen más de un par de polos, pero, no obstante, los polos siempre ocurren en pares.

24.3 Campos magnéticos

Si esparces algunas limaduras de hierro sobre una hoja de papel colocada encima de un imán, verás que las limaduras trazan un patrón ordenado de líneas en torno al imán.

El espacio alrededor del imán contiene un campo magnético. La forma del campo lo revelan las limaduras, que se alinean con las líneas del campo magnético que se extiende desde un polo y regresa al otro.

La dirección del campo afuera de un imán es del polo norte al polo sur. Donde las líneas están más juntas, el campo es más intenso. Las concentraciones de limaduras de hierro en los polos del imán de la Figura 24.2 muestran que la intensidad del campo magnético es mayor ahí. Si colocas otro imán o una pequeña brújula en cualquier parte del campo, sus polos se alinearán con el campo magnético.

F I G U R A 2 4 . 2

Vista superior de limaduras de hierro

esparcidas alrededor de un imán que

trazan un patrón de líneas de campo

magnético. Es interesante que las líneas

del campo magnético continúen en el

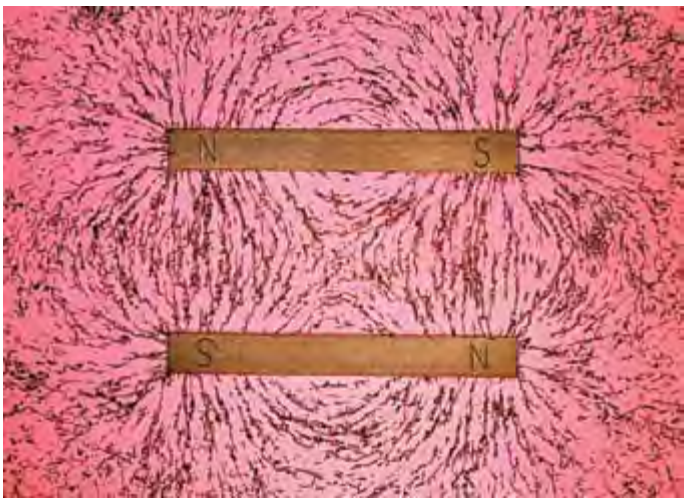
interior del imán (no reveladas por las

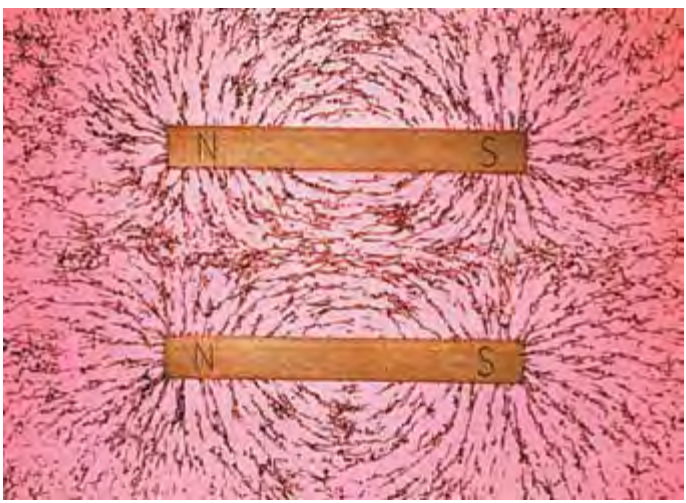
limaduras) y formen bucles cerrados.

El magnetismo está muy relacionado con la electricidad. Tal como una carga eléctrica está rodeada por un campo eléctrico, la misma carga también está rodeada por un campo magnético si ésta se

encuentra en movimiento. Este campo magnético se debe a las "distorsiones" del campo eléctrico causadas por el movimiento y esto lo SCREENCAST: Magnetismo

explicó Albert Einstein en 1905 en su teoría de la relatividad especial. En este texto no 3Los físicos teóricos han especulado durante más de 75 años sobre la posible existencia de "cargas" magnéticas discretas, denominadas monopolos magnéticos. Estas pequeñas partículas portarían un solo polo magnético norte o un solo polo magnético sur, y serían las contrapartes de las cargas positiva y negativa en electricidad. Se han hecho varios intentos por encontrar los monopolos, pero ninguno ha resultado exitoso. Todo mundo sabe que los imanes siempre tienen al menos un polo norte y un polo sur.





se entrará en detalles, excepto para reconocer que un campo magnético es un subproducto relativista del campo eléctrico. Las partículas cargadas en movimiento tienen asociadas con ellas tanto un campo eléctrico como un campo magnético. Un campo magnético se produce por el movimiento de una carga eléctrica.4

Si el movimiento de las cargas eléctricas produce magnetismo, ¿dónde está este movimiento en un imán de barra común? La respuesta es: en los electrones de los átomos que constituyen el imán. Estos electrones están en movimiento constante. Dos tipos de movimiento electrónico contribuyen al magnetismo: la revolución del electrón y el espín del electrón. Los electrones se comportan como si giraran en torno al núcleo atómico y también alrededor de su propio eje como trompos. En casi todos los imanes comunes, el espín del electrón es el que más contribuye al magnetismo.

Momento Sin momento

Todo electrón que gira es un pequeño imán. Un par de electrones que giran en la de torsión de torsión

misma dirección constituyen un imán más fuerte. Sin embargo, un par de electrones F I G U R A 2 4 . 3

que giran en direcciones contrarias trabajan uno contra el otro. Los campos magnéti-Cuando la aguja de la brújula no está

cos se cancelan. Es por esto que casi ninguna sustancia es imán. En la mayoría de los alineada con el campo magnético

átomos, los diversos campos se cancelan entre sí porque los electrones giran en direc-

(izquierda), las fuerzas sobre la aguja que ciones opuestas. Pero en materiales como el hierro, el níquel y el cobalto, los campos se dirigen en sentido opuesto producen

no se cancelan entre sí por completo. Por ende, cada átomo de hierro es un pequeño un par de momentos de torsión (lla-imán. Lo mismo sucede, aunque en menor medida, con los átomos de níquel y cobalto.

mados torcas o pares) que giran la aguja

La mayoría de los imanes comunes están hechos de aleaciones que contienen hierro, hasta alinearla (derecha).

níquel y cobalto en varias proporciones.5

F I G U R A 2 4 . 4

Patrones de campo magnético de un par

de imanes. (a) Los polos opuestos están

más cerca entre ellos, y (b) los polos

iguales están más cerca entre ellos.

(a)

(b)

24.4 Dominios magnéticos

El campo magnético de un átomo de hierro es tan intenso que las interacciones entre átomos adyacentes hacen que grandes grupos de ellos se alineen entre sí. Estos grupos de átomos alineados se llaman dominios magnéticos. Cada dominio está constituido por miles de millones de átomos alineados. Los dominios son microscópicos (Figura 24.5) y existen muchos de ellos en un cristal de hierro. De forma parecida a la alineación de átomos de hierro dentro de los dominios, los dominios también pueden alinearse entre sí.

F I G U R A 2 4 . 5

4

Vista microscópica de los dominios

Es interesante que, dado que el movimiento es relativo, el campo magnético es relativo. Por ejemplo, cuando magnéticos en un cristal de hierro. Las

una carga se mueve hacia ti, existe un campo magnético asociado con la carga en movimiento. Pero si te mueves junto con la carga, de modo que no haya movimiento en relación a ti, descubrirás que no hay campo magnético flechas azules que apuntan en diferentes

asociado a la carga. El magnetismo es relativista. De hecho, Albert Einstein fue el primero en explicar esto direcciones indican que dichos dominios cuando publicó su primer ensayo sobre la relatividad especial, "On the Electrodynamics of Moving Bodies"

no están alineados.

(Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento). (En los Capítulos 35 y 36 encontrarás más acerca de la relatividad.)

5El espín del electrón contribuye virtualmente a todas las propiedades magnéticas de los imanes hechos con aleaciones que contienen hierro, níquel, cobalto y aluminio. En los metales raros como el gadolinio, el movimiento orbital es más significativo.

Sin embargo, no todo pedazo de hierro es un imán. Esto es así porque los dominios en el hierro ordinario no están alineados. Piensa en un clavo de hierro común: los dominios en el clavo están orientados al azar. No obstante, muchos de ellos se inducen a alinearse cuando se acerca un imán. (Es interesante escuchar con un estetoscopio amplificador el traqueteo de los dominios que experimentan alineación en un pedazo de hierro cuando se aproxima un imán intenso.) Los dominios se alinean en forma muy parecida a como las cargas eléctricas en una hoja de papel se alinean en presencia de una barra con carga eléctrica. Cuando alejas el clavo del imán, el movimiento térmico ordinario

F I G U R A 2 4 . 6

hace que la mayoría o todos los dominios en el clavo

Wai Tsan Lee muestra clavos de hierro

regresen a su ordenamiento aleatorio. Sin embargo, si

que se convierten en imanes inducidos.

el campo del imán permanente es muy intenso, el clavo puede conservar cierto magnetismo permanente propio después de que los dos se hayan separado.

Para fabricar imanes permanentes, sólo se colocan pedazos de hierro o ciertas aleaciones de hierro en campos magnéticos intensos. Las aleaciones de hierro difieren; el Con frecuencia, las vacas tragan

hierro blanco es más fácil de imantar que el acero. Es de utilidad golpear el hierro para objetos metálicos que pueden per-sacudir cualquier dominio terco y que se alinee. Otra forma de hacer un imán perma-forarles el estómago. Es por ello

nente es golpear un trozo de hierro con un imán. El movimiento de golpeteo alinea que los ganaderos alimentan a las

vacas con imanes vacunos (largos

los dominios en el hierro. Si un imán permanente se deja caer o se calienta, parte de los y estrechos imanes de alnico), que

dominios salen de alineación y el imán se vuelve más débil.

atraen las piezas metálicas y redu-

cen la posibilidad de perforación

estomacal.

Hierro sin magnetizar

S

N

Hierro un poco magnetizado

S

N

F I G U R A 2 4 . 7

Pedazos de hierro en etapas sucesivas de

Hierro muy magnetizado

magnetización. Las flechas representan

dominios; la punta es un polo norte y

S

N

S

N

la cola es un polo sur. Los polos de los

dominios vecinos neutralizan sus efectos

Cuando un imán se rompe en

entre sí, excepto en los dos extremos de

dos pedazos, cada uno es un

un pedazo de hierro.

imán igualmente intenso

P U N T O D E C O N T R O L

¿Cómo es que un imán puede atraer un pedazo de hierro que no está

magnetizado?

La banda magnética de una tarje-

ta de crédito contiene millones de

pequeños dominios magnéticos

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

que se mantienen juntos mediante

Los dominios en el pedazo no magnetizado de hierro se inducen a la alineación un adhesivo de resina. Los datos se

me diante el campo magnético del imán cercano. Observa la semejanza de esto con codifican en código binario, donde

la Figura 22.13 del Capítulo 22. Al igual que los pedazos de papel que saltan hacia los ceros y unos se distinguen por

el peine, los pedazos de hierro saltarán hacia un imán intenso cuando se acerquen la frecuencia de inversiones de

a él. Pero, a diferencia de los pedazos de papel, después no se repelen. ¿Puedes dominio. Es bastante sorprendente cuán rápido brinda tu nombre

pensar en una razón por la que sucede esto?

cuando un empleado barre tu

tarjeta.

24.5 Corrientes eléctricas y campos magnéticos

Dado que una carga en movimiento produce un campo magnético, se deduce que una corriente de cargas también produce un campo magnético. Puedes mostrar el campo Brújulas

magnético que rodea un conductor portador de corriente si colocas una distribución magnéticas

de brújulas alrededor de un alambre (Figura 24.8) y haces pasar una corriente por él.

Las agujas de las brújulas se alinearán con el campo magnético producido por la corriente y mostrarán el campo como un patrón de círculos concéntricos alrededor del alambre. Cuando la corriente invierte su dirección, las agujas de las brújulas dan la vuelta, lo que demuestra que también cambia la dirección del campo magnético. Éste es el efecto que Oersted demostró por primera vez en su salón de clase.

Corriente

Si el alambre se dobla en una espira, las líneas del campo magnético se amontonan eléctrica

dentro de la espira (Figura 24.9). Si el alambre se dobla en otra espira, que coincida con la primera, la concentración de las líneas de campo magnético dentro de las espiras F I G U R A 2 4 . 8

se duplica. Se deduce que la intensidad del campo magnético en esta región aumenta Las brújulas muestran la forma circular

con el número de espiras. La intensidad del campo magnético es considerable para una del campo magnético que rodea al alam-bobina portadora de corriente con muchas espiras.

bre portador de corriente.

La Figura 24.10c muestra la concentración de la intensidad del campo magnético para múltiples espiras portadoras de corriente. Estas espiras constituyen una bobina, que se conoce como solenoide. El campo total dentro del solenoide es igual a la suma de los campos debidos a cada espira de corriente.

F I G U R A 2 4 . 9

Las líneas de campo magnético en torno

a un alambre portador de corriente se

amontonan cuando el alambre se dobla

en una espira.

Alambre portador de corriente

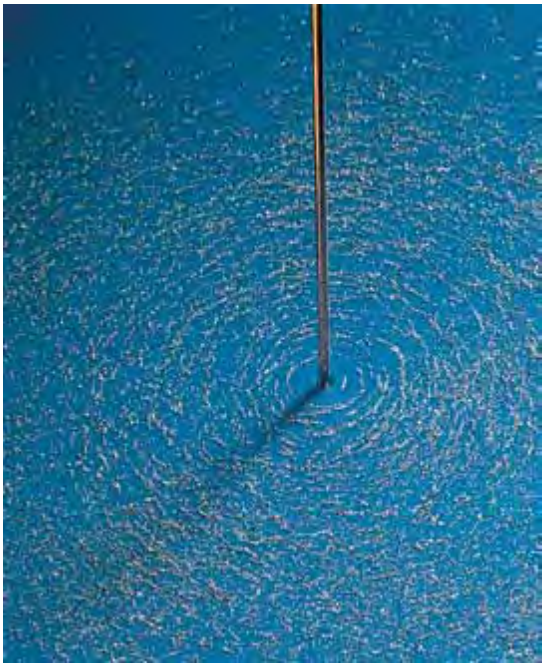
PRACTICANDO LA FÍSICA

Casi todos los objetos de hierro que te rodean están magnetizados en cierta medida.

Un archivero, un refrigerador e incluso las latas de alimentos de tu alacena tienen polos norte y sur inducidos por el campo magnético de la Tierra. Si acercas una brújula magnética a los objetos de hierro o acero de tu casa, descubrirás que el polo norte de la aguja de la brújula apunta hacia la parte superior de dichos objetos, y que el polo sur de la aguja de la brújula apunta a su parte inferior. Esto

demuestra que los objetos son imanes, que tienen un polo sur en la parte superior y un polo norte en la parte inferior.

¡Voltea de cabeza las latas de alimento que estaban en una posición horizontal y observa cuántos días transcurren para que los polos se inviertan!



C A PÍ T U LO 24 M AG N E T ISM O

459

24.6 Electroimanes

Una bobina de alambre portadora de corriente es un electroimán. La intensidad de un electroimán aumenta con sólo incrementar la corriente que pasa por la bobina y el número de vueltas en la bobina. Los imanes industriales adquieren más intensidad cuando tienen dentro de la bobina un pedazo de hierro. Es común observar en los desguaces electroimanes tan poderosos que levantan automóviles. Los dominios magnéticos en los núcleos de hierro se inducen a alinearse, y se agregan al campo. En el caso de los electroimanes extremadamente potentes, como los utilizados para controlar haces de partículas cargadas en los aceleradores de alta energía, no se usa hierro porque, después de cierto punto, todos sus dominios se alinean. Se dice que el imán está saturado, y aumentar la corriente eléctrica que fluye alrededor del núcleo ya no afecta más la magnetización del núcleo y ya no se agrega al campo.

(a)

(b)

(c)

F I G U R A 2 4 . 1 0

Limaduras de hierro esparcidas sobre papel revelan las configuraciones del campo magnético en torno a (a) un alambre portador de corriente, (b) una espira portadora de corriente y (c) una bobina de espiras portadora de corriente.

Los electroimanes no necesitan tener núcleos de hierro. Los electroimanes sin núcleo de hierro se utilizan en la transportación mediante levitación magnética, o "maglev" por magnetic levitated. La Figura 24.11 muestra un tren maglev, que no tiene motor diesel ni otro convencional. Los trenes maglev ya están en operación en China y Japón, y varios diseños todavía están en proceso de creación. En un diseño que ya es de uso comercial, la levitación se logra con bobinas magnéticas que corren a lo largo de la vía, llamada pista de guiado. Las bobinas repelen grandes imanes en la parte inferior del tren. Una vez que el tren levita algunos centímetros, se suministra energía a las bobinas dentro de las paredes de la pista de guiado, lo que impulsa al tren. Para lograr esto, se alterna continuamente la corriente eléctrica que alimenta a las bobinas, las que continuamente alternan su polaridad magnética. De esta forma, un F I G U R A 2 4 . 1 1

campo magnético jala el vehículo hacia adelante, mientras que un campo magnético más Un vehículo de levitación magnética: un atrás lo empuja hacia adelante. Los empujones y jalones alternados producen un empuje magplane. Mientras que los trenes con-hacia adelante. Dado que los trenes maglev flotan sobre un colchón de aire, la fricción que vencionales vibran cuando viajan sobre acompaña a los trenes convencionales se elimina. Las rapideces maglev, de aproximada- las vías a rapideces altas, los magplanes mente la mitad de la rapidez de los aviones comerciales, sólo está limitada por la fricción del pueden viajar sin vibración a rapideces aire y la comodidad de los pasajeros. Espera la expansión de esta tecnología en crecimiento. altas porque levitan sobre la pista de guiado.

Electroimanes superconductores

Los electroimanes más poderosos sin núcleos de hierro utilizan bobinas superconductoras a través de las cuales fluyen con facilidad grandes corrientes eléctricas. Recuerda del Capítulo 22 que en un superconductor no hay resistencia eléctrica que limite el flujo de carga eléctrica y, por tanto, no hay calentamiento, aun cuando la corriente es enorme. Los electroimanes que utilizan bobinas superconductoras producen campos

magnéticos muy poderosos, y lo hacen de un modo muy económico, porque no hay pérdidas por calor (aunque se usa energía para mantener fríos los superconductores).

En el Gran Colisionador de Hadrones de Ginebra, Suiza, imanes superconductores guían partículas de alta energía alrededor de un acelerador con más de 27.3 kilóme -

tros (17 millas) de circunferencia. En los hospitales se usan imanes superconductores en los dispositivos para obtener imágenes por resonancia magnética (IRM).

Sean superconductores o no lo sean, los electroimanes son parte de la vida cotidiana. Se encuentran en los sistemas de sonido, en los motores eléctricos, en los automóvi-F I G U R A 2 4 . 1 2

les e incluso en los sistemas de reciclado y reducción de basura para retirar fragmentos Un imán permanente levita sobre

metálicos. ¡Vivan los electroimanes!

un superconductor porque su campo

magnético no puede penetrar al material

superconductor.

24.7 Fuerzas magnéticas

Sobre las partículas cargadas en movimiento

Una partícula cargada en reposo no interactuará con un campo magnético estático. Pero si se mueve en un campo magnético la partícula cargada, el carácter magnético de una carga en movimiento se vuelve evidente. Experimenta una fuerza de

deflexión.6 La fuerza es más grande cuando la partícula se mueve

Haz de

en una dirección perpendicular a las líneas del campo magnético.

electrones

Fuerza

En otros ángulos, la fuerza es menor y se vuelve cero cuando las

partículas se mueven paralelas a las líneas del campo. En cualquier

caso, la dirección de la fuerza siempre es perpendicular a las líneas del campo magnético y a la velocidad de la partícula cargada (Figura

Campo

Haz

24.13). De modo que una partícula cargada en movimiento se desvía

magnético

cuando cruza un campo magnético, pero cuando viaja paralela al

F I G U R A 2 4 . 1 3

campo, no ocurre desviación.

Un haz de electrones se desvía mediante

Esta fuerza de deflexión es muy diferente de las fuerzas que ocurren en otras interac-un campo magnético.

ciones, como las fuerzas gravitacionales entre masas, las fuerzas eléctricas entre cargas y las fuerzas magnéticas entre polos magnéticos. La fuerza que actúa sobre una partícula cargada en

movimiento no actúa a lo largo de la línea que une las fuentes de interacción sino, en vez de el o, actúa perpendicularmente tanto al campo magnético como al haz de electrones.

La humanidad es afortunada de que las partículas cargadas se desvíen mediante campos magnéticos. Las partículas cargadas en los rayos cósmicos se desvían gracias al campo magnético de la Tierra. Aunque la atmósfera de la Tierra absorbe la mayor parte de ellas, la intensidad de los rayos cósmicos en la superficie de la Tierra sería mucho mayor sin el campo magnético protector de la Tierra.

F I G U R A 2 4 . 1 4

El campo magnético de la Tierra desvía

Sobre los alambres portadores de corriente

muchas partículas cargadas que consti-

La simple lógica indica que, si una partícula cargada que se mueve a través de un campo tuyen la radiación cósmica.

magnético experimenta una fuerza de deflexión, entonces una corriente de partículas cargadas que se mueven a través de un campo magnético también experimenta una fuerza de deflexión. Si las partículas están atrapadas dentro de un alambre cuando responden a la fuerza de deflexión, el alambre también será empujado (Figura 24.15).

Fuerza hacia

arriba

Fuerza hacia

F I G U R A 2 4 . 1 5

abajo

Un alambre portador de corriente

experimenta una fuerza en un campo

Corriente

magnético. (¿Puedes ver que esto es

continuación de lo que ocurre en la

Corriente

Figura 24.13?)

6Cuando partículas con carga eléctrica q y velocidad v se mueven perpendicularmente a través de un campo magnético con intensidad B, la fuerza F sobre cada partícula es tan sólo el producto de tres variables: F = qvB.

Para ángulos no perpendiculares, v en esta relación debe ser el componente de velocidad perpendicular a B.

C A PÍ T U LO 24 M AG N E T ISM O

461

Si se invierte la dirección de la corriente, la fuerza de deflexión actúa en la dirección contraria. La fuerza es más intensa cuando la corriente es perpendicular a las líneas de campo magnético. La dirección de la fuerza no es a lo largo de las líneas de campo magnético o a lo largo de la dirección de la corriente. La fuerza es perpendicular tanto En el complemento de Resolución

a las líneas del campo como a la corriente. Es una fuerza lateral.

de problemas, ¡aprenderás la regla

“simple” de la mano derecha!

Se observa que, así como un alambre portador de corriente desviará un imán tal como la aguja de una brújula (de nuevo, como lo descubrió Oersted), entonces, un imán desviará un alambre portador de corriente. El descubrimiento de estos vínculos complementarios entre electricidad y magnetismo creó mucho entusiasmo, y las personas comenzaron a aprovechar casi de inmediato la fuerza electromagnética para propósitos útiles —con gran sensibilidad en los medidores eléctricos y con gran fuerza en los motores eléctricos —.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Qué ley de la física te indica que, si un alambre portador de corriente produce una fuerza sobre un imán, entonces un imán debe producir una fuerza sobre un alambre portador de corriente?

VIDEO: Fuerzas magnéticas sobre

alambres portadores de corriente

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

La tercera ley de Newton, que se aplica a todas las fuerzas de la naturaleza.

Medidores eléctricos

El azaroso descubrimiento de

El medidor más simple para detectar corriente eléctrica es un imán que puede girar Galvani de la rana que se retorcía

con libertad: una brújula. El siguiente medidor más simple es una brújula en una bo-lo condujo a inventar la celda

bina de alambres (Figura 24.16). Cuando una corriente eléctrica pasa por la bobina, química y la batería. La próxima

cada espira produce su propio efecto sobre la aguja, de modo que puede detectarse una vez que levantes un cubo galvanizado, piensa en Luigi Galvani en su

corriente muy pequeña. Un instrumento sensible que indica la corriente se llama gal-laboratorio de anatomía.

vanómetro, llamado así en honor a Luigi Galvani, quien, en el siglo XVIII, descubrió que distintos metales provocaban el retorcimiento de la pata de una rana que estaba disecando.

F I G U R A 2 4 . 1 6

Un galvanómetro muy simple.

En la Figura 24.17 se muestra el diseño de un galvanómetro común. Éste emplea muchas espiras de alambre y, por tanto, es muy sensible. La bobina está montada y dispuesta para moverse, y el imán se mantiene estacionario. La bobina gira contra un resorte, de modo que cuanto más grande sea la corriente en sus devanados, mayor será su deflexión. Un galvanómetro puede calibrarse para medir corriente (amperes), en cuyo caso se llama amperímetro. O puede calibrarse para medir potencial eléctrico (volts), en cuyo caso se llama voltímetro.

F I G U R A 2 4 . 1 7

Diseño de un galvanómetro común.

F I G U R A 2 4 . 1 8

Tanto el amperímetro como el voltímetro son básicamente galvanómetros. (La resistencia eléctrica del instrumento se hace muy baja para el amperímetro y muy alta para el voltímetro.)

Motores eléctricos

Espira

Si el diseño del galvanómetro se modifica un poco, de modo que la deflexión realice giratoria

una rotación completa en lugar de una parcial, se tiene un motor eléctrico. La principal Contactos

diferencia es que, en un motor, la corriente se hace cambiar de dirección cada vez que estacionarios

la bobina realiza media rotación. Después de forzarse a girar media rotación, la bobina Corriente

continúa en movimiento justo a tiempo para que la corriente se invierta, con lo cual, en lugar de que la bobina invierta su dirección, es forzada a continuar otra media rotación en la misma dirección. Esto ocurre de forma cíclica para producir una rotación continua, la

cual se ha aprovechado para hacer funcionar relojes y dispositivos electrónicos, así como para levantar cargas pesadas.

F I G U R A 2 4 . 1 9

En la Figura 24.19 puedes ver el principio del motor eléctrico en un dibujo sencillo.

Un motor eléctrico simplificado.

Un imán permanente produce un campo magnético en una región en la que una espira rectangular de alambre está montada para girar en torno al eje punteado que se muestra. La corriente en la espira cambia de dirección con cada media vuelta y ocasiona una rotación continua.

Cualquier corriente en la espira se mueve en una dirección en el lado superior de la espira y en la dirección opuesta en el lado inferior (puesto que las cargas que fluyen hacia un extremo de la espira deben fluir hacia fuera del otro extremo). Si el lado superior de Un motor y un generador en reali-la espira se fuerza hacia la izquierda por el campo magnético, el lado inferior se fuerza dad son el mismo dispositivo, con

hacia la derecha, como si fuese un galvanómetro. Pero, a diferencia de lo que sucede con la entrada y la salida invertidos. El

un galvanómetro, la corriente en un motor se invierte durante cada media revolución dispositivo eléctrico en un auto-mediante contactos estacionarios en el eje. Las partes del alambre que giran y cepillan móvil híbrido es una combinación

motor/generador.

contra dichos contactos se llaman escobillas. De esta forma, la corriente en la espira alterna de modo que las fuerzas sobre las regiones superior e inferior no cambian de dirección mientras la espira gira. La rotación es continua en tanto se suministre corriente.

Aquí sólo se describe un motor CD muy simple. Para fabricar motores más grandes, con CD o CA, por lo general se sustituye el imán permanente con un electroimán que es energizado mediante la fuente de poder. Desde luego, se utiliza más de una sola espira. Muchas espiras de alambre se devanan en torno a un cilindro de hierro, llamado armadura, que entonces gira cuando el alambre porta corriente.

La llegada de los motores eléctricos puso fin a muchos trabajos pesados realizados por seres humanos y animales en muchas partes del mundo. Los motores eléctricos han cambiado enormemente la vida de las personas.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Cuál es la principal semejanza entre un galvanómetro y un motor eléctrico simple? ¿Cuál es la principal diferencia?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A S

En ambos, las bobinas se colocan en un campo magnético. Una fuerza produce rotación cuando pasa corriente por las bobinas. La principal diferencia es que la máxima rotación de la bobina en un galvanómetro es una media vuelta, en tanto que, en un motor, la bobina (enrollada sobre una armadura) gira muchas vueltas completas, lo que se logra al alternar la corriente con cada media vuelta de la armadura.

24.8 El campo magnético de la Tierra

Un imán suspendido o brújula apunta hacia el norte porque la Tierra misma es un imán enorme. La brújula se alinea con el campo magnético de la Tierra. Sin embargo, los polos magnéticos de la Tierra no coinciden con los polos geográficos; de hecho, los polos magnético y geográfico están muy separados (Figura 24.20). El polo magnético F I G U R A 2 4 . 2 0

en el hemisferio norte, por ejemplo, ahora se ubica a casi 1,800 kilómetros del polo La Tierra es un imán.

geográfico, en alguna parte de la región de la bahía de Hudson del norte de Canadá. El

C A PÍ T U LO 24 M AG N E T ISM O

463

otro polo se ubica al sur de Australia. Esto significa que las brújulas por lo general no apuntan hacia el norte verdadero. La discrepancia entre la orientación de una brújula y el norte verdadero se conoce como declinación magnética.

No se sabe con exactitud por qué la Tierra es un imán. La configuración del campo magnético de la Tierra es como el de un

intenso imán de barra colocado cerca del centro de la Tierra. Pero la Tierra no es un pedazo magnetizado de hierro, como un imán de barra. Simplemente está demasiado caliente para que cada átomo se mantenga en la orientación apropiada. De modo que es probable que la explicación tenga que ver con corrientes eléctricas en lo profundo de su interior. Unos 2,000 kilómetros por debajo del manto rocoso exterior de la Tierra (que tiene un grosor de casi 3,000 kilómetros) F I G U R A 2 4 . 2 1

yace la parte fundida que rodea el centro sólido. La mayoría de los científicos que estu- Las corrientes de convección en las dian la Tierra consideran que hay cargas en movimiento que dan vueltas dentro de la partes fundidas del interior de la Tierra parte fundida de la Tierra y crean el campo magnético. Algunos científicos especulan pueden impulsar corrientes eléctricas que las corrientes eléctricas son resultado de corrientes de convección (calor que sube que produzcan el campo magnético de desde el núcleo central; Figura 24.21) y que tales corrientes de convección, combinadas la Tierra.

con los efectos rotacionales de la Tierra, producen el campo magnético de la Tierra.

Debido al gran tamaño de la Tierra, la rapidez de las cargas en movimiento sólo necesita aproximadamente un milímetro por segundo para provocar el campo. Hay que estudiar más para encontrar una explicación más firme.

Cualquiera que sea la causa, el campo magnético de la Tierra no es estable; ha variado con el transcurso del tiempo geológico. La evidencia de esto proviene del análisis de las propiedades magnéticas de los estratos rocosos. Los átomos de hierro en un estado fundido están desorientados debido al movimiento térmico, pero una predominancia leve de los átomos de hierro se alinea con el campo magnético de la Tierra. Cuando ocurren enfriamiento y solidificación, esta predominancia registra la dirección del campo magnético de la Tierra en las rocas ígneas resultantes. El proceso es similar con las rocas sedimentarias, donde los dominios magnéticos en granos de hierro que se asientan en los sedimentos tienden a alinearse con el campo magnético de la Tierra y a quedar grabados en la roca que forman. El leve magnetismo que resulta puede medirse con instrumentos sensibles. A medida que se hacen pruebas con las muestras de roca de diferentes estratos formados a lo largo del tiempo geológico, se pueden realizar gráficas del campo magnético de la Tierra para diferentes periodos. Estos datos muestran que ha habido épocas en las que el campo magnético de la Tierra ha

disminuido hasta cero, seguido por una inversión de los polos.

Al igual que la cinta de un mag-

En los pasados 5 mil ones de años han ocurrido más de 20 inversiones. La más reciente netófono, la historia del fondo

ocurrió hace 700,000 años. Hubo inversiones previas hace 870,000 y 950,000 años. Estu-marino se conserva en un registro

dios de los sedimentos de las profundidades marinas indican que el campo virtualmente magnético.

desapareció durante 10,000 a 20,000 años hace más de 1 mil ón de años. No es posible predecir cuándo ocurrirá la siguiente inversión porque la secuencia de inversión no es regular. Pero existe una pista en las mediciones recientes que muestran una reducción de más del 5% de la intensidad del campo magnético de la Tierra en los últimos 100 años. Si este cambio se mantiene, podría tenerse otra inversión dentro de 2,000 años.

La inversión de los polos magnéticos no es exclusiva de la Tierra. El campo magnético del Sol se invierte en forma regular, con un periodo de 22 años. Este ciclo magnético de 22 años se ha vinculado, por evidencias en los anillos de los árboles, con los periodos de sequía de la Tierra. Es muy interesante que el muy conocido ciclo de 11

años de las manchas solares esté a la mitad del tiempo durante el cual el Sol gradualmente invierte su polaridad magnética.

Los vientos iónicos variables en la atmósfera terrestre provocan fluctuaciones más rápidas, pero mucho más pequeñas, en el campo magnético de la Tierra. Los iones en esta región se producen por las interacciones energéticas de los rayos ultravioleta y los rayos X solares con los átomos atmosféricos. El movimiento de estos iones produce una pequeña pero importante parte del campo magnético de la Tierra. Al igual que las capas inferiores de aire, la ionosfera es agitada por vientos. Las variaciones de estos vientos ocasionan casi todas las fluctuaciones rápidas del campo magnético de la Tierra. Es interesante que los vientos solares que llegan a la Tierra choquen con el campo magnético de la Tierra en lugar de chocar con la atmósfera.

Rayos cósmicos

El Universo es una galería de tiro de partículas cargadas. Se llaman rayos cósmicos y consisten en protones, partículas alfa y otros núcleos atómicos desprendidos de electrones, así como de electrones de alta energía. Los protones pueden ser restos del Big Bang; los núcleos más pesados probablemente se evaporaron de estrellas que explotaron. En cualquier caso, viajan a través del espacio con rapideces fantásticas y F I G U R A 2 4 . 2 2

constituyen la radiación cósmica que es peligrosa para los astronautas. Esta radiación Sección transversal de los cinturones

se intensifica cuando el Sol está activo y aporta partículas energéticas adicionales.

de radiación Van Allen, que aquí se

Los rayos cósmicos también son peligrosos para la instrumentación electrónica en el muestran sin la distorsión producida por espacio; impactos de núcleos de rayos cósmicos pueden hacer que bits de memoria de el viento solar.

cómputo se "inviertan" o que fallen pequeños microcircuitos. Por fortuna para quienes están sobre la superficie de la Tierra, la mayor parte de estas partículas cargadas no llegan a la superficie debido al grosor de la atmósfera. Los rayos cósmicos también son desviados por el campo magnético de la Tierra. Algunos de ellos quedan atrapados en los confines externos del campo magnético de la Tierra y constituyen los cinturones de radiación Van Allen (Figura 24.22).

Los cinturones de radiación Van Allen consisten en dos anillos con forma de dona que rodean la Tierra, llamados así en honor de James A. Belts, quien sugirió su existencia por datos recopilados por el satélite estadounidense Explorer I en 1958.7 El anillo interior se centra aproximadamente a 3,200 kilómetros sobre la superficie terrestre, y el anillo exterior, que es una dona más grande y más ancha, se centra aproximadamente a 16,000 kilómetros sobre la superficie. Los astronautas orbitan a distancias seguras muy por abajo de estos cinturones de radiación. Es probable que la mayor parte de las partículas cargadas (protones y electrones) atrapadas en el cinturón exterior pro-vengan del Sol. Las tormentas en el Sol arrojan partículas cargadas en grandes fuentes, muchas de las cuales pasan cerca de la Tierra y quedan atrapadas por su campo magnético. Las partículas atrapadas siguen rutas en espiral alrededor de las líneas de campo magnético de la Tierra y rebotan entre los polos magnéticos de la Tierra muy por arriba de la atmósfera. Las perturbaciones en el campo de la Tierra con frecuencia permiten que los iones caigan hacia la atmósfera, lo que produce que brillen como una lámpara fluorescente. Esta es la hermosa aurora boreal (o luces del norte); en el hemisF I G U R A 2 4 . 2 3

ferio sur, es la aurora austral.

Las auroras boreales en el cielo son

Es probable que las partículas atrapadas en el cinturón interior se hayan originado causadas por partículas cargadas en los

en la atmósfera de la Tierra. Este cinturón ganó electrones adicionales libres con las cinturones de Van Allen que golpean

explosiones de la bomba de hidrógeno a gran altitud en 1962.

moléculas atmosféricas.

A pesar del campo magnético protector de la Tierra, muchos rayos cósmicos "secundarios" llegan a la superficie de la Tierra.8 Estas son partículas creadas cuando los rayos cósmicos "primarios" —los provenientes del espacio exterior— golpean nú -

cleos atómicos en lo alto de la atmósfera. El bombardeo de rayos cósmicos es mayor en los polos magnéticos porque las partículas cargadas que golpean la Tierra no viajan a través de las líneas de campo magnético sino, más bien, a lo largo de las líneas de En ciencia no cabe la certidum-campo y no se desvían. El bombardeo de rayos cósmicos disminuye lejos de los pobre. Los científicos entienden que

los y es más pequeño en las regiones ecuatoriales. A latitudes medias, alrededor de todo conocimiento es provisional

cinco partículas golpean cada centímetro cuadrado a cada minuto a nivel del mar; y está sujeto a revisión. ¿Cuántos

este número aumenta rápidamente con la altitud. De modo que hay rayos cósmicos de los crímenes y crueldades en la

historia han sido perpetrados por

que penetran tu cuerpo mientras lees esto, ¡y aun cuando no leas esto!

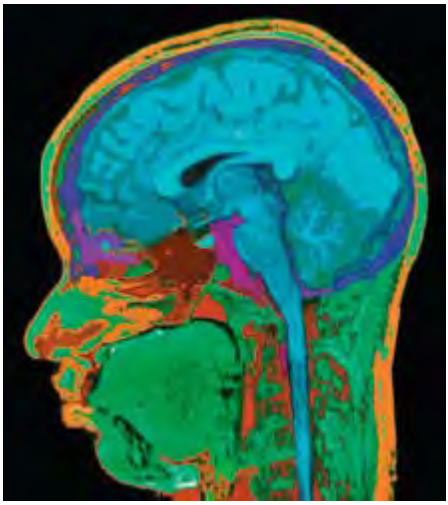
personas que tenían la certeza de

saber la verdad?

7En realidad, humor aparte, el nombre es James A. Van Allen (con su autorización).

8Algunos científicos biológicos especulan que los cambios magnéticos de la Tierra tuvieron una función muy importante en la evolución de las formas de vida. Una hipótesis es que, durante las primeras fases de la vida primitiva, el campo magnético de la Tierra era tan intenso que protegía las delicadas formas de vida contra las partículas cargadas con alta energía. Pero, durante periodos de intensidad cero, la radiación cósmica y el desbordamiento de los cinturones Van Allen aumentaron la tasa de mutación de las formas de vida más

resistentes, nada diferente de las mutaciones producidas por los rayos X en los famosos estudios de herencia de las moscas de la fruta. Las coincidencias entre las fechas en que aumentaron los cambios de vida y las fechas de las inversiones de los polos magnéticos en los últimos millones de años brindan sustento a esta hipótesis.



C A PÍ T U LO 24 M AG N E T ISM O

465

24.9 Biomagnetismo

Ciertas bacterias producen biológicamente granos de magnetita (un compuesto equivalente a las vetas de hierro) de un solo dominio que juntan para formar brújulas internas. Luego utilizan estas brújulas para detectar las inclinaciones del campo magnético de la Tierra. Dotados con un sentido de dirección, los microorganismos son capaces de ubicar suministros de alimentos. Es sorprendente que estas bacterias que viven al sur del ecuador construyan los mismos imanes de un solo dominio que sus contrapartes que viven al norte del ecuador,

¡pero los alinean en la dirección contraria

F I G U R A 2 4 . 2 4

para que coincidan con el campo magnético

Estas bacterias acuáticas flotantes no

en dirección opuesta en el hemisferio sur!

pueden percibir arriba y abajo mediante

la gravedad. En vez de ello, se orientan

Las bacterias no son los únicos organis-

con el campo magnético de la Tierra

mos vivos con brújulas magnéticas internas.

gracias a sus "brújulas" internas.

Las palomas tienen imanes de magnetita

con dominios múltiples dentro de sus cráneos, que están conectados mediante un gran número de nervios al cerebro de la paloma. Las palomas tienen un sentido magnético: no sólo pueden discernir direcciones longitudinales a lo largo del campo magnético de la Tierra, sino que también pueden detectar la latitud mediante las inclinaciones del campo de la Tierra. El material magnético también se encuentra en los abdómenes de las abejas, en cuyo comportamiento influyen pequeños campos magnéticos. Algunas avispas, mariposas monarca, tortugas marinas y peces se unen a las clasificaciones de criaturas que tienen un sentido magnético. Cristales de magnetita que recuerdan a los cristales observados en las bacterias magnéticas también se han encontrado en los cerebros humanos. Nadie sabe si guardan relación con las sensaciones humanas. Al igual que las criaturas mencionadas antes, es posible que los seres humanos compartan un sentido magnético común.

IRM: IMÁGENES POR RESONANCIA MAGNÉTICA

Las imágenes por resonancia magnética (IRM) constituyen

cual residen los protones.

una forma no invasiva de producir imágenes de alta

Las señales, que se detectan

resolución de los tejidos dentro del cuerpo. Bobinas

con sensores, se analizan con

superconductoras producen un intenso campo magnético hasta

una computadora para revelar

60,000 veces más intenso que el campo magnético de la Tierra, que

las densidades variables de los

se utiliza para alinear los protones de los átomos de hidrógeno en el
átomos de hidrógeno en el

cuerpo del paciente.

cuerpo y sus interacciones con el

Al igual que los electrones, los protones tienen una propiedad

tejido circundante. Las imágenes

de "espín", de modo que se alinearán con un campo magnético.

distinguen con claridad entre

A diferencia de la aguja de una brújula que se alinea con el

líquido y hueso.

campo magnético de la Tierra, el eje del protón bambolea en

Es interesante observar

torno al campo magnético aplicado. Los protones bamboleantes

que las IRM antes se

son golpeados por una ráfaga de ondas de radio ajustadas para

llamaban IRMN (imágenes

empujar el eje de giro de los protones en sentido lateral, de forma

por resonancia magnética nuclear) porque los núcleos de hidrógeno

que quede perpendicular al campo magnético aplicado. Cuando

resuenan con los campos aplicados. Sin embargo, debido a la fobia

las ondas de radio pasan y los protones regresan con rapidez a

de la gente por cualquier cosa "nuclear", los aparatos ahora se llaman su patrón de bamboleo, emiten débiles señales electromagnéticas

escáneres IRM. ¡Dile a tus amigos fóbicos que todos los átomos de

cuyas frecuencias dependen un poco del entorno químico en el

su cuerpo contienen un núcleo!

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)

Fuerza magnética. (1) Entre imanes, es la atracción mutua

Campo magnético. La región de influencia magnética

de polos magnéticos diferentes y la repulsión entre polos

alrededor de un polo magnético o una partícula cargada en

magnéticos iguales. (2) Entre un campo magnético y

movimiento.

una partícula cargada en movimiento, es una fuerza

Dominios magnéticos. Regiones agrupadas de átomos

de deflexión debida al movimiento de la partícula: la

magnéticos alineados. Cuando estas regiones se alinean unas

fuerza de deflexión es perpendicular a la velocidad de

con otras, la sustancia que las contiene es un imán.

las partículas y perpendicular a las líneas de campo

Electroimán. Imán cuyo campo se produce mediante una

magnético. Esta fuerza es mayor cuando la partícula

corriente eléctrica. Por lo general tiene forma de una bobina

cargada se mueve perpendicular a las líneas de campo y

de alambre con un pedazo de hierro en el interior de la

es menor (cero) cuando se mueve paralela a las líneas

bobina.

de campo.

Rayos cósmicos. Partículas de gran rapidez que viajan por todo el universo.

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N) 24.1 Magnetismo

24.6 Electroimanes

1. ¿Quién, y en qué contexto, descubrió la relación entre la

16. ¿Por qué un pedazo de hierro en una espira portadora de

electricidad y el magnetismo?

corriente aumenta la intensidad del campo magnético?

2. La fuerza entre partículas con carga eléctrica depende

17. ¿Por qué los campos magnéticos de los imanes

de la magnitud de cada carga, su distancia de separación,

superconductores con frecuencia son más intensos que los

¿y qué más?

de los imanes convencionales?

3. ¿Cuál es la fuente de la fuerza magnética?

24.7 Fuerzas magnéticas

24.2 Polos magnéticos

18. Cierto o falso: una partícula cargada debe moverse en

4. ¿La regla para la interacción entre polos magnéticos es

un campo magnético estacionario para que una fuerza

similar a la regla para la interacción entre partículas con

debida al campo actúe sobre ella.

carga eléctrica?

19. ¿En qué dirección en relación a un campo magnético se

5. ¿En qué forma los polos magnéticos son muy diferentes

mueve una partícula cargada para experimentar máxima

de las cargas eléctricas?

fuerza de deflexión? ¿Mínima fuerza de deflexión?

24.3 Campos magnéticos

20. ¿Qué efecto tiene el campo magnético de la Tierra

sobre la intensidad de los rayos cósmicos que golpean la

6. ¿Cómo se relaciona la intensidad del campo magnético

superficie de la Tierra?

con la cercanía de las líneas de campo magnético en

torno a un imán de barra?

21. ¿Qué dirección relativa entre un campo magnético y un

alambre portador de corriente resulta en la fuerza más

7. ¿Qué produce un campo magnético?

grande?

8. ¿Cuáles dos clases de movimiento rotacional parecen

22. ¿Cómo detecta corriente eléctrica un galvanómetro?

tener los electrones en un átomo?

23. ¿Cómo se llama un galvanómetro cuando se calibra para

24.4 Dominios magnéticos

leer corriente? ¿Cuando se calibra para leer voltaje?

9. ¿Qué es un dominio magnético?

24. ¿Con qué frecuencia se invierte la corriente en las espiras

10. A nivel microscópico, ¿cuál es la diferencia entre un clavo de

de un motor eléctrico?

hierro no magnetizado y un clavo de hierro magnetizado?

25. ¿Es correcto decir que un motor eléctrico es extensión de

11. ¿Por qué el hierro es magnético y la madera no lo es?

la física que sirve de base a un galvanómetro?

12. ¿Por qué soltar un imán de hierro sobre una acera de

24.8 El campo magnético de la Tierra

concreto lo convertirá en un imán más débil?

26. ¿Por qué es probable que no haya dominios magnéticos

24.5 Corrientes eléctricas y campos magnéticos

alineados en forma permanente en el núcleo de la Tierra?

13. En el Capítulo 22 aprendiste que la dirección del campo

27. ¿Qué son las inversiones de polo magnético?

eléctrico en torno a una carga puntual es radial a la carga.

28. ¿Cuál es la causa de las auroras boreales (luces del norte)?

¿Cuál es la dirección del campo magnético que rodea un

alambre portador de corriente?

24.9 Biomagnetismo

14. ¿Qué ocurre con la dirección del campo magnético

29. Menciona al menos seis criaturas que alojen pequeños

alrededor de una corriente eléctrica cuando la dirección

imanes en el interior de sus cuerpos.

de la corriente se invierte?

30. ¿Cuándo los rayos cósmicos penetran tu cuerpo?

15. ¿Por qué la intensidad del campo magnético es mayor

dentro de una espira de alambre portadora de corriente

que alrededor de una sección recta de alambre?

C A PÍ T U LO 24 R E V ISI Ó N

467

P I E N S A Y R E A L I Z A (A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 31. Encuentra la dirección y la inclinación de las líneas del

un par de alfileres comunes sin magnetizar a los lados del

campo magnético de la Tierra en tu localidad. Magnetiza

corcho. Pon a descansar los alfileres sobre los bordes de

una aguja grande de acero o un pedazo recto de alambre

un par de vasos de modo que la aguja o el alambre apunte

de acero al golpearlo una docena de veces con un imán

hacia el polo magnético. Debe inclinarse en línea con el

potente. Pasa la aguja o el alambre a través de un corcho

campo magnético de la Tierra.

en tal forma que, cuando el corcho flote, tu delgado

32. Una barra de hierro puede magnetizarse con facilidad

imán permanezca horizontal

si la alineas con las líneas de campo magnético de la

(paralelo a la superficie del

Tierra y la golpeas ligeramente unas cuantas veces con

agua). Para esto primero hay que

un martillo. Esto funciona mejor si la barra se inclina

ajustarlo de modo que se equilibre

para coincidir con la depresión del campo de la Tierra.

gravitacionalmente. Luego pon

El martillado sacude los dominios de modo que tienen

a flotar el corcho dentro de un

mayor capacidad para alinearse con el campo de la

recipiente de plástico o madera que

Tierra. La barra puede desmagnetizarse si la golpeas

contenga agua. Después coloca

cuando está orientada en una dirección este-oeste.

P I E N S A Y E X P L I C A (S Í N T E S I S)

33. Muchos cereales secos están fortificados con hierro, que se

componente horizontal del campo

agrega al cereal en forma de pequeñas partículas de hierro.

magnético de la Tierra. Dado que el

¿Cómo pueden separarse estas partículas del cereal?

polo norte de esta brújula es atraído

34. ¿En qué sentido todos los imanes son electroimanes?

hacia el norte, ¿la aguja flotará hacia el

35. Todos los átomos tienen cargas eléctricas en movimiento.

lado norte del tazón? Defiende tu respuesta.

¿Por qué, entonces, no todos los materiales son magnéticos?

47. ¿Mediante qué mecanismo las limaduras de hierro

36. Para fabricar una brújula, apunta un clavo de hierro

mostradas alrededor del imán de la Figura 24.2 se alinean

ordinario a lo largo de la dirección del campo magnético

con el campo magnético?

de la Tierra (que, en el hemisferio norte, está inclinado

48. El polo norte de una brújula es atraído hacia el polo

hacia abajo y hacia el norte) y golpéalo repetidamente

magnético norte de la Tierra, aunque polos iguales se

durante algunos segundos con un martillo o una roca.

repelen. ¿Qué indica esto acerca de la polaridad del Imán

Luego cuélgalo de su centro de gravedad con una cuerda.

Tierra en sus polos?

¿Por qué el acto de golpear magnetiza al clavo?

49. Se sabe que una brújula apunta hacia el norte porque la

37. Si colocas un pedazo de hierro cerca del polo norte de un

Tierra es un imán gigante. ¿La aguja que apunta hacia el

imán, ocurrirá atracción. ¿Por qué también ocurrirá atrac-

norte apunta al norte cuando la brújula se lleva hacia el

ción si colocas el mismo hierro cerca del polo sur del imán?

hemisferio sur?

38. ¿Los polos de un imán de herradura se atraen entre sí? Si

50. ¿En qué posición puede ubicarse una espira de alambre

doblas el imán de modo que los polos se acerquen, ¿qué

portadora de corriente en un campo magnético de modo

ocurre con la fuerza entre los polos?

que no tienda a girar?

39. ¿Por qué no es aconsejable hacer un imán de herradura

51. El imán A tiene un campo magnético con el doble de

con un material flexible?

intensidad que el imán B (a igual distancia) y, a cierta dis-

40. ¿Qué tipo de campo de fuerza rodea una carga eléctrica

tancia, jala sobre el imán B con una fuerza de 50 N. ¿Con

estacionaria? ¿Qué otro campo la rodea cuando se mueve?

cuánta fuerza, entonces, el imán B jala sobre el imán A?

41. ¿Qué diferencia hay entre los polos magnéticos de los imanes

52. En la Figura 24.15 se observa un imán que ejerce una

de refrigerador comunes y los imanes de barra comunes?

fuerza sobre un alambre portador de corriente. ¿Un

42. Un amigo te dice que la puerta de un refrigerador, debajo

alambre portador de corriente ejerce una fuerza sobre un

de su revestimiento de plástico pintado, está hecha de

imán? ¿Por qué sí o por qué no?

aluminio. ¿Cómo podrías comprobar si esto es cierto (sin

53. Un imán potente atrae un clip hacia sí mismo con cierta

rayarlo de ninguna manera)?

fuerza. ¿El clip ejerce una fuerza sobre el imán potente?

43. ¿Por qué un imán atraerá un clavo ordinario o clip, pero

Si no lo hace, ¿por qué no? Si lo hace, ¿ejerce tanta fuerza

no un lápiz de madera?

sobre el imán como el imán ejerce sobre él? Defiende tus

respuestas.

44. ¿Por qué los imanes permanentes en realidad no son

permanentes?

54. Un alambre recto portador de corriente está horizontal y

orientado de sur a norte. Cuando la aguja de una brújula

45. ¿Cualquier polo de un imán atraerá un clip? Explica

se coloca por abajo o arriba de él, ¿en qué dirección

qué ocurre en el interior del clip atraído. (Sugerencia:

apunta la aguja de la brújula?

considera la Figura 22.13.)

55. Una bocina consiste en un cono unido a una bobina

46. Una manera de fabricar una brújula es pegar una aguja

portadora de corriente ubicada en un campo magnético.

magnetizada en un pedazo de corcho y ponerlo a flotar

¿Cuál es la relación entre las vibraciones en la corriente y

en un tazón lleno de agua. La aguja se alineará con el

las vibraciones del cono?

468

PA R T E C I N CO

EL EC T R I CI DA D Y M AG N E T I SM O

56. ¿Un imán superconductor usará menos potencia eléctrica

66. ¿Qué cambios en la intensidad de los rayos cósmicos en la

que un electroimán tradicional de alambre de cobre con

superficie de la Tierra esperarías durante periodos en los

la misma intensidad de campo? Defiende tu respuesta.

cuales el campo magnético de la Tierra pasa por una fase

57. Cuando se construyen embarcaciones con casco de

cero mientras experimenta una inversión de polos?

hierro, la ubicación del embarcadero y la orientación de la

67. En un espectrómetro de masas (consulta la Figura 34.14),

embarcación en el embarcadero se registran en una placa

se dirigen iones hacia un campo magnético, donde se cur-

de bronce permanentemente unida al navío. ¿Por qué?

van y después golpean un detector. Si varios átomos ioni-

58. Un haz de electrones pasa a través de un campo magnético

zados de manera individual viajan con la misma rapidez

sin desviarse. ¿Qué puedes concluir acerca de la orientación

a través del campo magnético, ¿esperarías que todos ellos

del haz en relación con el campo magnético? (Ignora

se desviaran por la misma cantidad, o diferentes iones se

cualquier otro campo.)

doblarían en distintas magnitudes? Defiende tu respuesta.

59. ¿Un electrón en reposo en un campo magnético estacio-

68. Una forma de proteger contra los rayos cósmicos

nario puede ponerse en movimiento mediante el campo

un hábitat en el espacio exterior es con una frazada

magnético? ¿Y qué hay de un electrón colocado en reposo

absorbente de cierto tipo, que funcionaría de forma muy

en un campo eléctrico?

parecida a la atmósfera que protege a la Tierra. Conjetura

60. Un protón se mueve en una trayectoria circular perpen-

acerca de una segunda forma de proteger el hábitat que

dicular a un campo magnético constante. Si la intensidad

también sería similar al blindaje natural de la Tierra.

del campo del imán aumenta, ¿el diámetro de la trayecto-

69. Si tienes dos barras de hierro, una

ria circular aumenta, disminuye o permanece igual?

magnetizada y una no magnetizada, y

61. Dos partículas cargadas se proyectan hacia un campo

ningún otro material a la mano, ¿cómo

magnético que es perpendicular a sus velocidades. Si las

podrías determinar cuál barra es el

partículas se desvían en direcciones opuestas, ¿qué te dice

imán?

esto acerca de ellos?

70. Históricamente, sustituir los caminos de tierra con cami-

62. Un campo magnético puede desviar un haz de electrones,

nos pavimentados redujo la fricción sobre los vehículos.

pero no puede realizar trabajo sobre los electrones para

Sustituir los caminos pavimentados con vías de acero

cambiar sus rapideces. ¿Por qué?

redujo la fricción aún más. ¿Qué paso reciente elimina la

63. Se dice que dentro de un laboratorio hay o un campo

fricción de las vías sobre los vehículos? ¿Qué fricción per-

eléctrico o un campo magnético, mas no ambos. ¿Qué

manece después de eliminar la fricción de las vías?

experimentos puedes realizar para establecer qué tipo

71. ¿Un par de alambres portadores de corriente ejercen fuer-

de campo hay en el laboratorio?

za uno sobre otro?

64. Los residentes del norte de Canadá son bombardeados

72. ¿Cuál es el efecto magnético de colocar dos alambres,

con radiación cósmica más intensa que los residentes

con iguales corrientes pero direcciones opuestas, juntos

de México. ¿Por qué esto es así?

o girados uno en torno al otro?

65. ¿Por qué los astronautas se mantienen a altitudes por

73. En la preparación para un estudio de IRM, ¿por qué a los

abajo de los cinturones de radiación Van Allen cuando pacientes se les pide que se quiten gafas, relojes, joyería y otros objetos metálicos?

P I E N S A Y D I S C U T E (E V A L U A C I Ó N)

74. Tu compañero de estudio afirma que un electrón siempre experimenta una fuerza en un campo eléctrico, pero no siempre en un campo magnético. ¿Estás de acuerdo? ¿Por qué sí o por qué no?

75. Una "aguja de inclinación" es un pequeño imán montado sobre un eje horizontal de modo que pueda balancearse hacia arriba o hacia abajo (como una brújula colocada sobre su lado). ¿Dónde sobre la Tierra una aguja de inclinación apunta de manera casi vertical? ¿Dónde sobre la Tierra apuntará de manera casi horizontal?

79. Un ciclotrón es un aparato que acelera partículas cargadas a gran rapidez mientras siguen una trayectoria en espiral que se expande. Las partículas cargadas están sujetas tanto a un campo eléctrico como a un campo magnético. ¿Estás de acuerdo? ¿Por qué sí o por qué no?

tico. Uno de estos

76. ¿En qué dirección apuntará la aguja de una brújula, si

campos aumenta la rapidez de las partículas cargadas, y el

tiene libertad de apuntar en todas direcciones, cuando

otro campo hace que sigan una trayectoria curva. ¿Cuál

se ubique cerca del polo magnético norte de la Tierra en

campo realiza cuál función?

Canadá?

80. Un imán puede ejercer una fuerza sobre una partícula

77. ¿Cuál es la fuerza magnética neta sobre la aguja de una

cargada pero no puede cambiar la energía cinética de la

brújula? ¿Mediante qué mecanismo la aguja de una brú-

partícula. ¿Por qué no?

jula se alinea con un campo magnético?

81. Un haz de protones de alta energía sale de un ciclotrón.

78. Tu amigo dice que, cuando una brújula se lleva a través del

¿Supones que hay un campo magnético asociado a estas

ecuador, da la vuelta y apunta en la dirección opuesta. Tu

partículas? ¿Por qué sí o por qué no?

otro amigo dice que esto no es verdad, que las personas en

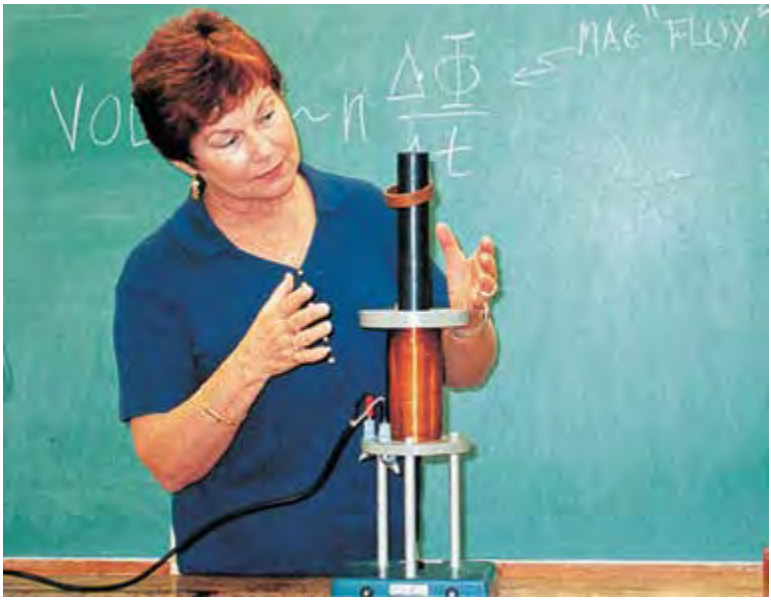
82. Cuando una corriente pasa a través de un resorte devana-

el hemisferio sur usan el polo magnético sur de la brújula

do helicoidalmente, el resorte se contrae como si se com-

para apuntar hacia el polo más cercano. ¿Tú qué dices?

primiera. ¿Cuál es tu explicación?



Electricity+Magn
connect to become
Light!

C A P Í T U L O 2 5

Inducción 2

electromagnética

25.1 Inducción electromagnética

3

25.2 Ley de Faraday

25.3 Generadores y corriente alterna

25.4 Producción de potencia

25.5 Transformadores

25.6 Autoinducción

25.7 Transmisión de potencia

25.8 Inducción de campo

4

1 Jean Curtis suscita una discusión entre los alumnos para explicar por qué el anillo de cobre levita sobre el núcleo de hierro del electroimán. 2 Un transformador de vecindario común por lo general disminuye 2,400 volts a 240 volts para las casas y pequeños negocios. 3 Z. Tugba Kahyaoglu muestra a sus alumnos cómo un imán modifica el giro de una armadura cuando invierte la polaridad del imán. 4 Sheron Snyder convierte energía mecánica en energía electromagnética, la que a su vez se convierte en luz.

470

47

PA R T F

E I V

C IEN CO

EL EC T R I CI T Y A

DA N D M

D Y M AG

AG NNE ET TI I

S SM

M O

importantes en química, electrólisis y especialmente electri-

cidad y magnetismo. En 1831 hizo su más notable descu-

En tiempos pasados, la mayoría de los grandes colabo-

radores científicos eran hombres con recursos finan-

cieros. Las personas que no tenían dinero estaban brimiento. Cuando movió un imán hacia las espiras de un muy ocupadas ganándose la vida y no disponían del tiem-alambre, indujo corriente eléctrica en el as. Ésta es la induc-

po que exigen las investigaciones científicas serias. Michael

ción electromagnética, que coincidentemente la descubrió más

Faraday fue una excepción.

o menos al mismo tiempo en Estados Unidos Joseph Henry

Michael Faraday fue uno de los cuatro hijos de James (el material para el aislamiento de las espiras de alambre de Faraday, quien era herrero en un pueblo al sureste de Lon-Henry fue donado, con lágrimas en los ojos, por su esposa,

dres. Michael sólo tenía una educación escolar básica y fue

quien sacrificó parte de la seda de su vestido de bodas para

en gran medida autodidacta. A los 13 años de edad se con-

cubrir los alambres). En aquel a época la única forma de pro-

virtió en aprendiz de un encuadernador local y, durante su

ducir una corriente eléctrica sustancial era con baterías. La

aprendizaje de siete años, leyó muchos libros en el tal er de

inducción electromagnética dio lugar a la era de la electricidad.

encuadernación. Se interesó mucho en la ciencia, especial-

Las habilidades matemáticas de Faraday se limitaban al

mente en la electricidad. En 1812, al final de su formación,

álgebra simple y no se extendían hasta la trigonometría. En

y con 20 años de edad, Faraday asis-

consecuencia, comunicó sus ideas de manera gráfica y con

tió a las conferencias impartidas por

lenguaje simple. Imaginó que los efectos eléctricos y magné-

el renombrado químico inglés sir ticos serían transportados por "líneas de fuerza". Ahora se Humphry Davy, de la Royal Institu-les l ama líneas de campos eléctrico y magnético, y siguen

tion y la Royal Society. Faraday tomó

siendo herramientas útiles en la ciencia y la ingeniería.

apuntes detal ados, los puso en forma

Faraday rehusó participar en la producción de armas quí-

de libro y envió a Davy un libro con

micas para la guerra de Crimea por razones éticas. Era pro-

más de 300 páginas de las conferen-

fundamente religioso y conoció a su esposa, Sarah Barnard,

cias. Davy quedó muy impresionado

mientras asistía a la iglesia. No tuvieron hijos. Fue elegido

y felicitó a Faraday, aunque al prin-

para ser miembro de sociedades prestigiosas y gozó de un alto

cipio le recomendó permanecer en el

estatus científico en sus últimos años de vida. Rechazó ser

negocio de la encuadernación. Sin embargo, al año siguien-

cabal ero y dos veces se negó a ser presidente de la Royal Society.

te, cuando el asistente de Davy fue despedido por peleonero,

Destinó grandes esfuerzos a proyectos de servicio para com-

Davy invitó a Faraday a ocupar su puesto.

pañías privadas y el gobierno británico: aumentó la seguridad

En la sociedad inglesa clasista de la época, Faraday no

de las minas de carbón, inventó nuevas formas de operar los
era considerado un cabal ero. Cuando Davy fue a una gira
faros para la navegación y hal ó otras maneras de controlar la
de 18 meses por el continente, en compañía de su esposa,
contaminación. Faraday fue un auténtico "ecologista".
Faraday fue con el os pero viajó afuera del carruaje y comió
La unidad de capacitancia eléctrica, el farad, recibe su
con la servidumbre porque la esposa de Faraday se rehusó a
nombre en honor de Faraday. Murió a la edad de 75 años,
tratarlo como un igual. No obstante, Faraday tuvo oportu-
en 1867. Antes de su muerte rechazó que se le sepultara en la
nidad de conocer a la élite científica de Europa y escuchó un
abadía de Westminster. Ahí se encuentra una placa conme-
montón de ideas estimulantes.
morativa con su nombre, cerca de la tumba de Isaac Newton.
Faraday se encaminó a ser uno de los más importantes cien-
De hecho, Faraday fue enterrado en un lote en la iglesia a la
tíficos experimentales de la época. Realizó descubrimientos que
asistía.

25.1 Inducción electromagnética

Faraday y Henry descubrieron que la corriente eléctrica podía producirse en un alambre con sólo mover un imán adentro o afuera de sus espiras (Figura 25.1). No se necesitan baterías ni ninguna otra fuente de voltaje, sólo el movimiento de un imán en una espira de alambre. Este fenómeno de inducir voltaje al cambiar el campo magnético en las espiras de alambre se llama inducción electromagnética. El voltaje es causado, o inducido, por el movimiento relativo entre un alambre y un campo magnético; esto

es: que el campo magnético de un imán se mueva cerca de un conductor estacionario o que el conductor se mueva en un campo magnético estacionario (Figura 25.2).

F I G U R A 2 5 . 1

Cuanto más grande sea el número de espiras de alambre que se mueven en un campo Cuando el imán se coloca en la bobina,

se induce un voltaje en la bobina y sus

magnético, mayor es el voltaje inducido (Figura 25.3). Empujar un imán en una bo-cargas se ponen en movimiento.

bina con el doble de espiras inducirá el doble de voltaje; empujarlo en una bobina con 10 veces más espiras inducirá 10 veces más voltaje; y así sucesivamente. Puede parecer

F I G U R A 2 5 . 2

En la espira de alambre se induce un

voltaje cuando el campo magnético se

mueve y pasa por el alambre o el alam-

bre se mueve por el campo magnético.

que se obtiene algo (energía) a cambio de nada con sólo aumentar el número de espiras en una bobina de alambre. Pero, si supones que la bobina está conectada a un resistor u otro dispositivo que disipa energía, esto no es así. Se descubre que es más difícil empujar el imán al interior de una bobina compuesta por un número mayor de

espiras.

F I G U R A 2 5 . 3

Cuando un imán se inserta en una bobi-

na que tiene el doble de espiras que otra

bobina, se induce el doble de voltaje.

Si el imán se inserta en una bobina con

S

S

S

tres veces más espiras, entonces se indu-

ce tres veces más voltaje.

N

N

N

Esto se debe a que el voltaje inducido produce una corriente, que, a su vez, produce un electroimán, el cual repele el imán en tu mano. Más espiras significan más voltaje, lo cual significa que se realiza más trabajo para inducirlo (Figura 25.4). La cantidad de voltaje inducido depende de cuán rápido las líneas de campo magnético entran o salen de la bobina. Un movimiento muy lento apenas produce voltaje. El movimiento rápido induce mayor voltaje.

La inducción electromagnética está a tu alrededor. En la carretera, ésta activa los semáforos cuando un automóvil pasa por encima de las bobinas de alambre que están bajo la superficie de la carretera, y cambia su campo magnético. Los automóviles híbridos la utilizan para convertir la energía del frenado en energía eléctrica para sus baterías. La inducción electromagnética la percibes en los sistemas de seguridad de los FIGURA 25.4

aeropuertos cuando cruzas bobinas verticales y, si llevas contigo una cantidad impor- Es más difícil empujar el imán en una tante de hierro, éste cambia el campo magnético de las bobinas y dispara una

alarma. bobina que tiene más espiras porque Se le utiliza en las tarjetas bancarias cuando su banda magnética se desliza por un es- el campo magnético de cada espira cáner. Como verás al final del capítulo, y al comienzo del siguiente, incluso es la base de corriente resiste al movimiento del de las ondas electromagnéticas que llamas luz.

imán.

P U N T O D E C O N T R O L

¿La inducción electromagnética (IEM) es una fuente de energía?

Cambiar un campo magnético

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

en una espira cerrada induce un

No. La IEM no es una fuente de energía, sino una manera de transformar energía voltaje. Si la espira está en un

mecánica en energía eléctrica. Para producir energía mediante IEM es indispensable conductor eléctrico, entonces se

induce corriente.

realizar trabajo.

472

PA R T E C I N CO

EL EC T R I CI DA D Y M AG N E T I SM O

25.2 Ley de Faraday

La inducción electromagnética se resume mediante la ley de Faraday, que afirma:1

El voltaje inducido en una bobina es proporcional al producto de su número de espiras, el área transversal de cada espira y la tasa a la que cambia el campo magnético dentro de dichas espiras.

La cantidad de corriente producida por la inducción electromagnética depende no sólo del voltaje inducido, sino también de la resistencia de la bobina y el circuito al cual está conectado.2 Por ejemplo, un imán se puede insertar y sacar de una espira cerrada de caucho y meter y sacar de una espira cerrada de cobre. El voltaje inducido F I G U R A 2 5 . 5

en cada una es el mismo, siempre que las espiras sean del mismo tamaño y el imán Las pastillas fonocaptoras de las guita-se mueva con la misma rapidez. Pero la corriente en cada una es muy diferente. Los rras son pequeñas bobinas con imanes

electrones en el caucho perciben el mismo campo eléctrico que los del cobre, pero en su interior. Los imanes magnetizan

sus enlaces con los átomos fijos impiden el movimiento de la carga que ocurre de un las cuerdas de acero. Cuando las cuerdas modo tan libre en el cobre.

vibran, se induce un voltaje en las bobi-

Se han mencionado dos formas de inducir voltaje en una espira de alambre: cuando nas y se aumenta mediante un amplificador; el sonido se produce mediante

mueves la espira cerca de un imán y cuando mueves un imán cerca de la espira. Existe una bocina.

una tercera forma: cuando cambias una corriente en una espira cercana. Los tres casos tienen el mismo ingrediente esencial: un campo magnético variable en la espira.

P U N T O D E C O N T R O L

Las linternas de inducción no ne-

cesitan baterías. Sacude la linterna

1. ¿Qué ocurre cuando un bit de información almacenado magnéticamente durante más o menos 30 segundos

en un disco de computadora gira bajo la cabeza lectora que contiene y generarás hasta 5 minutos de

una pequeña bobina?

iluminación brillante. La inducción

2. Si empujas un imán dentro de una bobina conectada a un resistor, como electromagnética ocurre cuando

se muestra en la Figura 25.4, sentirás resistencia cuando empujas. ¿Por un imán interno se desliza entre

las bobinas que cargan un capa-

qué esta resistencia es mayor en una bobina que tiene más espiras?

citor. Cuando el brillo disminuya,

sacude de nuevo. Tú eres quien

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

suministra la energía para cargar

1. El campo magnético variable de la bobina induce un voltaje. De esta forma, la el capacitor.

información almacenada magnéticamente en el disco se convierte en señales eléctricas.

2. Dicho de manera simple, se necesita más trabajo que suministre más energía para que más corriente la disipe en el resistor. También puedes verlo de esta forma: cuando empujas un imán dentro de una bobina, haces que la bobina se convierta en un imán (un electroimán). Cuantas más espiras haya en la bobina, más intenso será el electroimán que produzcas y con más fuerza empujará de vuelta contra el SCREENCAST: Inducción

electromagnética

imán que estás moviendo. (Si el electroimán de la bobina atrajera a tu imán en lugar de repelerlo, se crearía energía de la nada y se violaría la ley de conservación de la energía. Pero esto no ocurre.)

Cuando bajas la rapidez de un

automóvil híbrido al frenarlo, el

motor eléctrico se convierte en un

1

generador y carga una batería.

En forma de ecuación,

campo magnético

Voltaje inducido □ número de espiras × área de cada espira ×

tiempo

2La corriente también depende de la "inductancia" de la bobina. La inductancia mide la tendencia de una bobina a resistir un cambio de corriente porque el magnetismo producido por una parte de la bobina actúa para oponerse al cambio de corriente en otras partes de la bobina. En los circuitos CA, es semejante a la resistencia, lo que depende de la frecuencia de la fuente CA y del número de espiras de la bobina. En este libro no se abordará este tema.

25.3 Generadores y corriente alterna

Cuando un extremo de un imán se inserta y se saca repetidas veces de una bobina de alambre, la dirección del voltaje inducido alterna. A medida que aumenta la intensidad del campo magnético dentro de la bobina (a medida que el imán entra en la bobina), el voltaje inducido en la bobina se dirige en una dirección. Cuando la intensidad del campo magnético disminuye (a medida que el imán sale de la bobina), el voltaje se induce en la dirección opuesta. La frecuencia del voltaje alterno que se induce es igual a la frecuencia del campo magnético variable en el interior de la espira.

Es más práctico inducir voltaje con el movimiento de una bobina que con el movimiento de un imán. Esto puede hacerse si giras la bobina (o espira) en un campo magnético Entrada mecánica Salida eléctrica estacionario (Figura 25.6). Esta configuración se llama generador. La construcción de un generador es, en principio, idéntica a la de un motor. Parecen iguales, pero las funciones de entrada y salida se invierten. En un motor, la energía eléctrica es la entrada y la energía mecánica es la salida; en un generador, la energía mecánica es la entrada y la energía eléctrica es la salida. Ambos dispositivos tan sólo transforman

Espira giratoria

energía de una forma en otra.

Es interesante comparar la física de un motor y un gene-

rador y ver que ambos funcionan de acuerdo con el mismo

Imán

principio básico: que electrones en movimiento experimen-

F I G U R A 2 5 . 6

tan una fuerza que es mutuamente perpendicular tanto a Un generador simple. En la espira se induce un voltaje cuando ésta su velocidad como al campo magnético que atraviesan (Fi-gira en el campo magnético.

gura 25.7). A la desviación del alambre (movimiento como

resultado de la corriente) se le llamará efecto motor, y a lo que ocurre como resultado de la ley de la inducción (corriente como resultado de movimiento) se le llamará efecto generador. Estos efectos se resumen en las partes (a) y (b) de la figura (donde, por convención, las flechas de corriente y fuerza se aplican a una carga positiva). Estúdialas. ¿Puedes observar que los dos efectos están relacionados?

F I G U R A 2 5 . 7

Fuerza magnética

Fuerza

(a) Efecto motor: cuando la carga se

Cargas en movimiento

magnética

mueve a lo largo del alambre, hay una

Campo

(corriente)

fuerza ascendente perpendicular sobre

Campo

magnético

la carga. Dado que no hay una ruta

magnético

conductora ascendente, la fuerza sobre

la carga jala el alambre hacia arriba.

Alambre

Cargas

Alambre

(b) Efecto generador: cuando un alam-

e imán

en movimiento

bre sin corriente inicial se mueve hacia

que se mueve

estacionarios

abajo, la carga en el alambre experimen-

(a)

(b)

hacia abajo

ta una fuerza de deflexión perpendicu-

lar a su movimiento. Existe una ruta

conductora en esta dirección, de modo

que la carga se mueve y constituye una

corriente.

En la Figura 25.8 puedes ver el ciclo de inducción electromagnética. Observa que, cuando la espira de alambre gira en el campo magnético, cambia el número de líneas de campo magnético en el interior de la espira. Cuando el plano de la espira es perpendicular a las líneas de campo, se encierra el número máximo de líneas. A medida que la espira gira, en efecto corta las líneas, de modo que menos líneas están encerradas. Cuando el plano de la espira es paralelo a las líneas de campo, ninguna línea está encerrada. La rotación continua aumenta y disminuye el número de líneas encerradas en una forma cíclica, y la mayor tasa de cambio en las líneas de campo ocurre cuando el número de líneas de campo encerradas se vuelve cero. Por tanto, el voltaje inducido es mayor a medida que la espira gira y pasa por una orientación VIDEO: Aplicación de la IEM

paralela a las líneas. Puesto que el voltaje inducido por el generador alterna, la corriente producida es CA, corriente alterna.3 La corriente alterna de las casas se produce con generadores estandarizados, de modo que la corriente pasa por 60 ciclos de cambio a cada segundo: 60 hertz.

F I G U R A 2 5 . 8

Voltaje

A medida que la espira gira, el vol-

taje inducido (y la corriente) cambia

de magnitud y dirección. Una rota-

ción completa de la espira produce

un ciclo completo en el voltaje (y en

la corriente).

Tiempo

P U N T O D E C O N T R O L

¿En qué momento se necesita una entrada de energía para que salga energía mediante inducción electromagnética?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Siempre.

25.4 Producción de potencia

Unos 50 años después de que Michael Faraday y Joseph Henry descubrieran la inducción electromagnética, Nikola Tesla y George Westinghouse dieron un uso práctico a estos hallazgos y demostraron al mundo que la electricidad podía generarse de mane-Para hacer un gran descubrimien-

ra confiable y en cantidades suficientes para iluminar ciudades enteras.

to, no es suficiente con estar en

el lugar correcto en el momento

Potencia de turbogenerador

correcto: también son importantes

la curiosidad y el trabajo arduo.

Tesla construyó generadores muy parecidos a los que están en funcionamiento en la actualidad, pero un poco más complicados que el modelo sencillo que se analizó antes.

Los generadores de Tesla tenían armaduras —núcleos de hierro enrollados con mano-jos de alambre de cobre— que se hacían girar dentro de intensos campos magnéticos mediante una turbina, la cual,

a su vez, giraba mediante la energía del vapor o del agua que caía. Las espiras de alambre giratorias de la armadura cortaban el campo magnético de los electroimanes circundantes, lo que en con-

secuencia inducía un voltaje y una corriente alternos.

Puedes pensar en este proceso desde un punto de

Vapor

vista atómico. Cuando los alambres de la armadura

giratoria cortan el campo magnético, fuerzas electro-

magnéticas con dirección opuesta actúan sobre las

cargas negativas y positivas. Los electrones responden

a esta fuerza con un movimiento masivo momentá-

neo relativamente libre en una dirección por toda la

retícula cristalina del cobre; los átomos de cobre, que

en realidad son iones positivos, se fuerzan en la direc-

ción contraria. Sin embargo, dado que los iones están

anclados en la retícula, es difícil que lleguen a mover-

se. Sólo los electrones se mueven; se desplazan de ida

y vuelta en forma alternada con cada rotación de la

F I G U R A 2 5 . 9

El vapor impulsa la turbina, que está

3 Con escobillas apropiadas y otros medios, la CA de las espiras puede convertirse en CD para hacer un gene-conectada a la armadura del generador.

rador CD.

armadura. La energía de este desplazamiento electrónico se registra

en los electrodos terminales del generador.

Potencia MHD

Los electrones

Un interesante dispositivo, similar al turbogenerador,

se fuerzan hacia el

es el generador MHD (magnetohidrodinámico), que

electrodo superior

elimina la turbina y la armadura giratoria por com-

pleto. En lugar de hacer que las cargas se muevan en

un campo magnético vía una armadura giratoria, un

Los iones

plasma de electrones e iones positivos se expande por

positivos se

una boquilla y se mueve con rapidez supersónica a

fuerzan hacia

Plasma con

el electrodo inferior

través de un campo magnético. Al igual que en la alta rapidez

armadura de un turbogenerador, el movimiento de

las cargas a través de un campo magnético da lugar a

un voltaje y a un flujo de corriente en concordancia

F I G U R A 2 5 . 1 0

con la ley de inducción de Faraday. Mientras que las

Un generador MHD simplificado.

“escobillas” de un generador convencional llevan la corriente hacia el circuito de carga Fuerzas con direcciones opuestas actúan externo, en el generador MHD la misma función la realizan placas conductoras, o elec- sobre las partículas positivas y nega-trodos (Figura 25.10). A diferencia del turbogenerador, el generador MHD puede operar tivas en el plasma de alta rapidez que a cualquier temperatura a la que pueda calentarse el plasma, ya sea por combustión o se mueve por el campo magnético. El por procesos nucleares. La temperatura alta resulta en una eficiencia termodinámica resultado es una diferencia de voltaje entre los dos electrodos. Entonces fluye

alta, lo cual significa más potencia por la misma cantidad de combustible y menos calor corriente de un electrodo al otro a de desecho. La eficiencia aumenta aún más cuando el calor de “desecho” se utiliza para través de un circuito externo. No hay convertir agua en vapor y accionar un generador convencional de turbina de vapor.

partes móviles; sólo el plasma se mueve.

Esta sustitución de las bobinas de cobre giratorias por un plasma que fluye se ha En la práctica, se usan electroimanes vuelto funcional sólo a partir del desarrollo de la tecnología para producir plasmas con superconductores.

una temperatura suficientemente alta. Las plantas de corriente utilizan un plasma a alta temperatura formado por la combustión de combustibles fósiles en aire u oxígeno.4

Es importante saber que los generadores no producen energía, tan sólo convierten energía de alguna otra forma en energía eléctrica. Como se estudió en el Capítulo 7, la energía de una fuente, ya sea combustible fósil o nuclear, o viento o agua, se convierte en energía mecánica para impulsar la turbina. El generador unido convierte la mayor parte de esta energía mecánica en energía eléctrica. Algunas personas creen que la electricidad es una fuente primaria de energía.

No lo es. Es un portador de energía que necesita una fuente.

25.5 Transformadores

Sin duda, la energía eléctrica puede transportarse a lo largo de alambres, y ahora se verá cómo puede transportarse a través del espacio vacío. La energía puede transferirse de Primario

un dispositivo a otro con el arreglo simple que se muestra en la Figura 25.11. Observa que un embobinado está conectado a una batería y el otro está conectado a un galvanómetro. Es habitual referirse al embobinado conectado a la fuente de poder como el primario (entrada) y al otro como el secundario (salida). En cuanto el interruptor se cierra en el primario y la corriente pasa a través de su embobinado, una corriente Secundario

también ocurre en el secundario, aun cuando no haya conexión material entre los dos embobinados. Sin embargo, en el secundario, sólo ocurre un breve pico de corriente. F I G U R A 2 5 .11

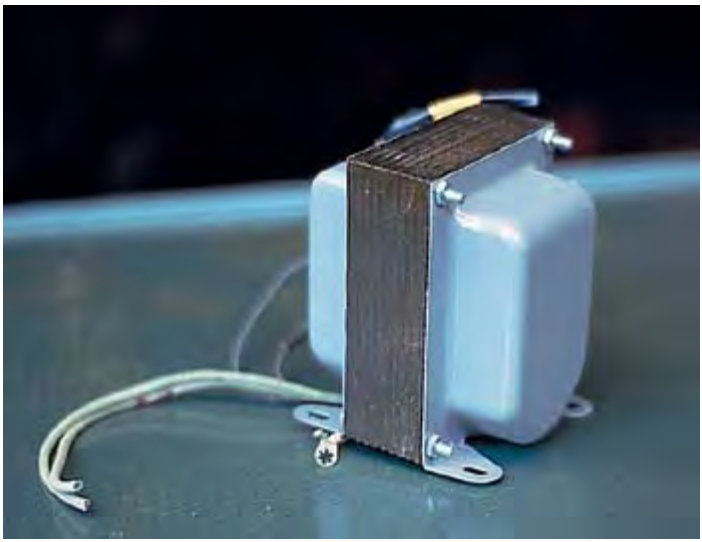
Después, cuando se abre el interruptor del primario, de nuevo se registra un pico de Siempre que el interruptor del primario corriente en el secundario, pero en la dirección opuesta.

se abre o se cierra, se induce un voltaje

en el circuito secundario.

Ésta es la explicación: cuando la corriente comienza a fluir por el embobinado, alrededor del primario se acumula un campo magnético. Esto significa que el campo magnético crece (esto es, cambia) alrededor del primario. Pero, dado que los embobinados 4Temperaturas más bajas son suficientes cuando el fluido conductor de electricidad es un metal líquido, por lo general litio. Un sistema de potencia MHD de metal líquido se conoce como sistema de potencia LMMHD

(por sus siglas en inglés).



476

PA R T E C I N CO

EL EC T R I CI DA D Y M AG N E T I SM O

están cerca uno del otro, este campo variable se extiende hacia el embobinado secundario, lo que en consecuencia induce un voltaje en el secundario. Este voltaje inducido Primario Secundario

sólo es temporal porque, cuando la corriente y el campo magnético del secundario llegan a un estado estacionario —esto es, cuando el campo magnético ya no cambia—, ya no se induce un voltaje en el secundario. Pero, cuando el interruptor se apaga, la corriente en el primario desciende a cero. El campo magnético alrededor del embobi-Entrada CA

nado colapsa, con lo que induce un voltaje en el embobinado secundario, que percibe F I G U R A 2 5 . 1 2

el cambio. Se observa que el voltaje se induce siempre que un campo magnético cambia Un transformador simple.

a través del embobinado, sin importar la razón.

P U N T O D E C O N T R O L

Cuando el interruptor del primario de la Figura 25.11 se abre o se cierra, el galvanómetro del secundario registra una corriente. Pero cuando el interruptor permanece cerrado, no se registra corriente en el galvanómetro del secundario. ¿Por qué?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Cuando el interruptor permanece en la posición cerrada, existe una corriente estacionaria en el primario y un campo magnético estacionario alrededor del embobinado.

Este campo se extiende hacia el secundario pero, a menos que haya un cambio en el campo, no ocurre inducción electromagnética.

Si colocas un núcleo de hierro dentro de los embobinados primario y secundario de la configuración de la Figura 25.11, el campo magnético dentro del primario se intensifica por la alineación de dominios magnéticos. El campo también se concentra en el núcleo y se extiende hacia el secundario, que intercepta más del cambio en el campo.

El galvanómetro mostrará picos de corriente mayores cuando el interruptor del primario se abra o cierre. En lugar de abrir y cerrar un interruptor para producir el cambio del campo magnético, supón que para activar al primario se usa una corriente alterna.

Entonces, la frecuencia de los cambios periódicos en el campo magnético es igual a la frecuencia de la corriente alterna. Ahora se tiene un transformador (Figura 25.12). En la Figura 25.13 se muestra una configuración más eficiente.

F I G U R A 2 5 . 1 3

Un transformador práctico y más

eficiente. Los embobinados primario y

secundario están enrollados en la parte

Primario

interna del núcleo de hierro (amarillo),

lo que guía las líneas magnéticas alter-

nas (verde) producidas por la CA en el

primario. El campo alternante induce

un voltaje CA en el secundario. En

consecuencia, la potencia a un voltaje

del embobinado primario se transfiere

al embobinado secundario a un voltaje

Secundario

diferente.

Si el primario y el secundario tienen igual número de espiras de alambre (por lo general llamadas vueltas), entonces los voltajes alternos de entrada y salida serán iguales.

Pero si el embobinado secundario tiene más vueltas que el primario, el voltaje alterno producido en el embobinado secundario será mayor que el producido en el primario. En este caso, se dice que el voltaje sube (aumenta). Si el secundario tiene el doble de vueltas que el primario, el voltaje en el secundario será el doble que en el primario.

Puedes ver esto con las configuraciones de la Figura 25.14. Considera primero el caso simple de una sola espira primaria conectada a una fuente alterna de 1 volt, y una sola espira secundaria conectada al voltímetro CA (a). La espira secundaria intercepta el campo magnético variable de la primaria, y un voltaje de 1 V se induce en la

secundaria. Si otra espira se enrolla alrededor del

1 V

núcleo, de modo que el transformador tenga dos

secundarios (b), intercepta el mismo cambio en el

1 V

campo magnético. Se ve que en este embobinado

también se induce 1 V. No hay necesidad de sepa-

(a)

rar ambos secundarios. Podrías unirlos (c) y aún así

tener un voltaje inducido total de 1 V 1 1 V, o 2 V.

1 V

Esto es equivalente a decir que un voltaje de 2 V se

inducirá en un solo secundario que tenga el doble

de espiras que el primario. Si el secundario se deva-

(b)

na con tres veces más espiras, entonces se inducirá

CA de 1 volt

2 V

el triple de voltaje. El voltaje incrementado puede

iluminar una señal de neón o enviar potencia a tra-

vés de una larga distancia.

(c)

Si el secundario tiene menos vueltas que el primario, el voltaje alterno producido en el secundario será menor que el producido en el primario. Se dice que el voltaje se redu-F I G U R A 2 5 .1 4

ce

(a) El voltaje de 1 V inducido en el

. Este voltaje reducido puede operar con seguridad un tren eléctrico de juguete. Si el secundario es igual al voltaje del prima-secundario tiene la mitad de vueltas que el primario, entonces sólo la mitad de voltaje rio. (b) Un voltaje de 1 V también se induce en el secundario. De modo que la energía eléctrica puede alimentarse en el se induce en el secundario agregado primario a un voltaje alterno dado y tomarse del secundario a un voltaje alterno mayor porque intercepta el mismo cambio en o menor, dependiendo del número relativo de vueltas en los devanados de las bobinas campo magnético del primario. (c) Los primaria y secundaria. La relación entre los voltajes primario y secundario con respecto voltajes de 1 V cada uno inducidos en al número relativo de vueltas está dada por:

los dos secundarios de una vuelta son

equivalentes a un voltaje de 2 V induci-

Voltaje primario

voltaje del secundario

do en un solo secundario de dos vueltas.

=

Número de vueltas del primario número de vueltas del secundario

Podría parecer que se obtiene algo por nada con un transformador que sube el voltaje. No es así, pues la conservación de la energía

siempre regula lo que puede ocurrir.

Cuando el voltaje sube, la corriente en el secundario es menor que en el primario. En realidad, el transformador transfiere energía de una bobina a la otra. No te equivoques en este punto: un transformador de ninguna forma puede aumentar la energía, eso nunca pasa de acuerdo con la conservación de energía. Un transformador incrementa o disminuye el voltaje sin un cambio de energía. La tasa a la que la energía se transfiere se llama potencia. La potencia usada en el secundario la suministra el primario. El primario no da más de lo que usa el secundario, de acuerdo con la ley de conservación de la energía. Si ignoras la pequeña pérdida de potencia debida al calentamiento de los embobinados y el núcleo, entonces

Potencia dentro del primario 5 potencia fuera del secundario

La potencia eléctrica es igual al producto del voltaje y la corriente, por lo que puede decirse (Voltaje 3 corriente)

5 (voltaje 3 corriente)

primario

secundario

Se ve que, si el secundario tiene más voltaje que el primario, tendrá menos corriente que el secundario. La facilidad con la que los voltajes pueden incrementarse o disminuirse con un transformador es la principal razón por la que la mayoría de la potencia eléctrica es CA en lugar de CD.

P U N T O D E C O N T R O L

1. Si 100 V de CA pasan a través del primario de 100 vueltas de un transformador, ¿cuál será la salida de voltaje si el secundario tiene 200 vueltas?

2. Si supones que la respuesta a la pregunta anterior es 200 V y el secundario está conectado a un reflector con una resistencia de 50 V, ¿cuál será la corriente CA en el circuito secundario?

3. ¿Cuál es la potencia en el embobinado secundario?

4. ¿Cuál es la potencia en el embobinado primario?

5. ¿Cuál es la corriente CA extraída por el embobinado primario?

6. El voltaje subió y la corriente bajó. La ley de Ohm dice que un aumento de voltaje producirá un aumento de la corriente. ¿Existe aquí alguna contradicción, o la ley de Ohm no se aplica a circuitos que tengan transformadores?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

100 V

V

1. A partir de

=

x

, verás que

100 vueltas del primario 200 vueltas del secundario

x 5 200 V.

2. A partir de la ley de Ohm, 200 V/50 V 5 4 A.

3. Potencia 5 voltaje 3 corriente 5 200 V 3 4 A 5 800 W.

4. Por la ley de conservación de la energía, la potencia en la bobina primaria es la misma, 800 W.

5. 8 A, el doble (100 V 3 ? A 5 800 W).

6. ¡La ley de Ohm está vivita y coleando! La corriente en el secundario es igual al voltaje inducido dividido entre la carga (resistencia), pero es menor sólo cuando se compara con la corriente mayor extraída por el primario. I V

5 I V

.

primario

secundario

Es interesante que no haya una resistencia convencional en el primario, sólo una resistencia a la transferencia de energía hacia el secundario (consulta la Figura 25.4).

25.6 Autoinducción

Las espiras portadoras de corriente de una bobina interactúan no sólo con las espiras de otras bobinas, sino también con las espiras de la misma bobina. Cada espira de una bobina interactúa con el campo magnético alrededor de la corriente de otras espiras de la misma bobina. Esto es autoinducción. Se produce un voltaje autoinducido. Este voltaje siempre está en una dirección que se opone al voltaje variable que lo produce y suele denominarse "fuerza contraelectromotriz" o simplemente "contra-fem".5 En este libro no se abordará la autoinducción ni las contra-fem, excepto para

reconocer un efecto común y peligroso.

Supón que una bobina con un gran número de vueltas se usa como electroimán y se activa con una fuente CD, tal vez una batería pequeña. Entonces, la corriente de la bobina se acompaña de un intenso campo magnético. Cuando se desconecta la batería por abrir un interruptor, mejor prepárate para una sorpresa. Cuando el interruptor se abre, la corriente en el circuito desciende rápidamente a cero y el campo magnético de la bobina experimenta una reducción súbita (Figura 25.15). ¿Qué ocurre cuando en una bobina cambia de manera súbita un campo magnético, incluso si es la misma bobina la que lo produce? La respuesta es que se induce un voltaje. El campo magnético que colapsa en forma rápida, con su almacén de energía puede inducir un voltaje enorme, tan grande que desarrolla una fuerte chispa a través del interruptor, ¡o hacia F I G U R A 2 5 . 1 5

ti, si tú eres quien abre el circuito! Por esta razón, los electroimanes están conectados Cuando el interruptor se abre, el campo

a un circuito que absorbe la carga excesiva y evita que la corriente caiga muy súbita-magnético de la bobina colapsa. Este

mente. Esto reduce el voltaje autoinducido. Por cierto, ésta también es la razón por la cambio súbito en el campo puede indu-cual, para desconectar los electrodomésticos, debes apagar el interruptor, y no jalar el cir un voltaje enorme.

enchufe. Los circuitos del interruptor pueden evitar un cambio súbito de corriente.

5La oposición de un efecto de inducción a una causa inductora se conoce como ley de Lenz; ésta es una consecuencia de la conservación de la energía.

C A PÍ T U LO 25 I N DU CCI Ó N EL EC T RO M AG N É T I C A 479

25.7 Transmisión de potencia

Casi toda la energía eléctrica que se vende en la actualidad está en forma de CA, de manera tradicional debido a la facilidad con la que puede transformarse de un volta -

Observa los transformadores en los

postes eléctricos de tu vecindario.

je a otro.6 Grandes corrientes en los alambres producen calor y pérdidas de energía, de Son los intermediarios entre las

modo que la potencia se transmite a lo largo de grandes distancias a voltajes altos y co-estaciones eléctricas y cada uno de

rrientes respectivamente bajas (potencia 5 voltaje 3 corriente). La potencia se genera los consumidores; con frecuencia

a 25,000 V o menos y se incrementa cerca de la estación eléctrica hasta a 750,000 V

zumban cuando hacen su trabajo.

para una transmisión a larga distancia, luego se disminuye por etapas en subestaciones y puntos de distribución hasta los voltajes usados en las aplicaciones industriales (con frecuencia 440 V o más) y para las casas (240 y 120 V).

F I G U R A 2 5 . 1 6

Transmisión de potencia.

Entonces, la energía se transfiere de un sistema de alambres de conducción a otros mediante inducción electromagnética. Se necesita sólo un pequeño paso adicional para descubrir que los mismos principios explican la eliminación de los alambres y el envío de energía desde una antena radiotransmisora hasta un receptor de radio a muchos kilómetros de distancia. En la actualidad, los teléfonos móviles, las tabletas y todo tipo de aparatos electrónicos lo demuestran. Extiende estos principios sólo un pequeñísimo paso más, a la transformación de la energía de los electrones vibratorios en el Sol y a la energía de la vida sobre la Tierra. Los efectos de la inducción electromagnética son de muy largo alcance.

25.8 Inducción de campo

La inducción electromagnética explica la inducción de voltajes y corrientes. En realidad, los campos más básicos están en la raíz tanto de los voltajes como de las corrientes.

La visión moderna de la inducción electromagnética es que los campos eléctrico y magnético son inducidos. Éstos, a su vez, producen los voltajes ya considerados. De modo que la inducción ocurre haya o no haya alambres o algún otro medio conductor.

En este sentido más general, la ley de Faraday afirma:

Un campo eléctrico se induce en cualquier región del espacio donde un campo magnético cambie con el tiempo.

Existe un segundo efecto, una extensión de la ley de Faraday. Es lo mismo, excepto que los papeles de los campos eléctrico y magnético se intercambian. Es una de las muchas simetrías de la naturaleza. Este efecto fue anticipado por el físico británico James Clerk Maxwell alrededor de 1860 y se conoce como la contraparte de Maxwell Las ondas electromagnéticas rara

a la ley de Faraday:

vez interactúan entre sí. El espacio

que te rodea está lleno de ondas

Un campo magnético se induce en cualquier región del espacio donde un cam-de radio, señales de televisión,

po eléctrico cambie con el tiempo.

mensajes de teléfonos móviles y

luz, y cada una "hace su propia

En cada caso, la intensidad del campo inducido es proporcional a la tasa de cambio del labor" e ignora a todas las demás.

campo inducido. Los campos eléctrico y magnético inducidos están en ángulo recto Cuán afortunado eres.

uno con respecto al otro.

6En la actualidad, las instalaciones eléctricas pueden transformar voltajes CD con el uso de la tecnología de semiconductores. Sigue de cerca los adelantos recientes en la tecnología de superconductores y espera los cambios resultantes en la transmisión de potencia.

Maxwell vio el vínculo entre las ondas electromagnéticas y la luz.7

Si las cargas eléctricas se ponen a vibrar en el intervalo de frecuencias que coinciden con las de la luz,

¡se producen ondas que son luz! Maxwell descubrió que la luz son simplemente ondas Hace doscientos años, las personas

electromagnéticas en el intervalo de frecuencias a las que el ojo es sensible.

obtenían luz con aceite de ballena.

Debido a la inducción electromagnética, la energía de los ríos elevados se ha aprove-

¡Las ballenas deben estar agrade-

cidas de que los seres humanos

chado, convertido en electricidad y transportado a ciudades distantes. El advenimiento descubrieran cómo aprovechar la

de los motores, los generadores y los transformadores ocurrió casi al mismo tiempo que electricidad!

se libraba la guerra civil estadounidense. Desde una perspectiva amplia de la historia de la humanidad, hay poca duda de que eventos como la Guerra de Secesión palidecen con una insignificancia provinciana frente al evento más significativo del siglo XIX: el descubrimiento y la aplicación de las leyes del electromagnetismo.

7En vísperas de su descubrimiento, cuenta la leyenda que Maxwell tenía una cita con una joven dama con quien se casaría después. Mientras caminaban por un jardín, su acompañante comentaba la belleza y maravilla de las estrellas. Maxwell le preguntó cómo se sentiría si supiera que caminaba al lado de la única persona en el mundo que sabía realmente qué era la luz de las estrellas. Y era cierto. En aquella época, James Clerk Maxwell era la única persona en el mundo que sabía que la luz de cualquier tipo es energía transportada en ondas de campos eléctricos y magnéticos que se regeneraban unos a otros de manera continua.

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)
Inducción electromagnética. Creación de voltaje cuando un

Generador. Dispositivo de inducción electromagnética que

campo magnético cambia con el tiempo. Si el campo mag-

produce una corriente eléctrica cuando gira una bobina

nético en el interior de una espira cerrada cambia en alguna

dentro de un campo magnético estacionario. Un generador

forma, se induce un voltaje en la espira:

convierte energía mecánica en energía eléctrica.

campo magnético

Transformador. Dispositivo que transfiere potencia eléctrica Voltaje inducido □ área de las espiras ×

tiempo

de una bobina de alambre a otra mediante inducción elec-

tromagnética, con el propósito de transformar un valor de

Éste es un enunciado de la ley de Faraday. (Si muchas espiras

voltaje en otro.

están conectadas juntas en una bobina, el voltaje inducido se

multiplica por el número de espiras.) La inducción de voltaje

Contraparte de Maxwell a la ley de Faraday. Un campo

en realidad es el resultado de un fenómeno más fundamen-

magnético se crea en cualquier región del espacio en la

tal, por lo general, la inducción de un campo eléctrico.

que un campo eléctrico cambie con el tiempo. La magnitud

del campo magnético inducido es proporcional a la tasa a

Ley de Faraday. El voltaje inducido en una bobina es pro-

la que cambia el campo eléctrico. La dirección del campo

porcional al producto del número de sus espiras, el área

magnético inducido está en ángulo recto respecto del campo

transversal de cada espira y la tasa a la que cambia el campo

eléctrico variable.

magnético en el interior de dichas espiras.

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N) 25.1 Inducción electromagnética

8. ¿Cuál es la frecuencia común de la CA en las casas de

1. ¿Qué importante descubrimiento hicieron los físicos

Estados Unidos?

Michael Faraday y Joseph Henry?

25.4 Producción de potencia

2. ¿Qué debe cambiar para que en una bobina de alambre

9. ¿Quién descubrió la inducción electromagnética y quién

ocurra inducción electromagnética?

le dio un uso práctico?

25.2 Ley de Faraday

10. ¿Qué es una armadura?

3. Enuncia la ley de Faraday.

11. ¿Qué es lo que usualmente suministra la energía de entra-

4. ¿Cuáles son las tres formas en las que puede inducirse

da a una turbina?

voltaje en una espira de alambre?

12. ¿Es correcto decir que un generador produce energía?

25.3 Generadores y corriente alterna

Defiende tu respuesta.

5. ¿Cómo se relaciona la frecuencia del voltaje inducido con

13. ¿Cuáles son las principales diferencias entre un generador

la frecuencia con la que un imán entra y sale de una bobi-

MHD y un generador convencional?

na de alambre?

14. ¿Un generador MHD emplea la ley de inducción de

6. ¿Cuáles son las diferencias y semejanzas básicas entre un

Faraday? Explica.

generador y un motor eléctrico?

25.5 Transformadores

7. ¿La corriente que produce un generador común es CA o CD?

15. ¿Qué nombre recibe la tasa a la que se transfiere la energía?

C A PÍ T U LO 25 R E V ISI Ó N

481

16. ¿Es correcto decir que un transformador aumenta la ener-

25.7 Transmisión de potencia

gía eléctrica? Defiende tu respuesta.

24. ¿Cuál es el propósito de transmitir potencia a altos volta-

17. ¿Cuál de los siguientes cambia un transformador: el vol-

jes a través de largas distancias?

taje, la corriente, la energía o la potencia?

25. ¿La transmisión de energía eléctrica necesita conductores

18. ¿Cuál es la diferencia entre la entrada de potencia a un

eléctricos entre la fuente y el receptor? Cita un ejemplo

transformador eficiente y la salida de potencia?

para defender tu respuesta.

19. ¿Exactamente qué reduce un transformador reductor?

20. En un transformador reductor, ¿cómo se compara la

25.8 Inducción de campo

corriente de entrada, con la corriente de salida?

26. ¿Quién extendió la ley de Faraday para campos eléctricos

21. ¿Por qué un transformador necesita CA?

variables?

22. ¿Cuál es la principal ventaja de la CA sobre la CD?

27. ¿Qué induce la rápida alternancia de un campo magnético?

28. ¿Qué induce la rápida alternancia de un campo eléctrico?

25.6 Autoinducción

29. En la manera como Maxwell ve la ley de Faraday,

23. Cuando el campo magnético cambia en una bobina de

¿se necesitan alambres?

alambre, se induce voltaje en cada espira de la bobina.

30. ¿Cómo se llaman las ondas electromagnéticas en el

¿Se inducirá voltaje en una espira si la fuente del campo

intervalo de frecuencias que coinciden con lo que pueden

magnético es la misma bobina?

ver los ojos?

P I E N S A Y R E A L I Z A (A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 31. Escribe una carta a un pariente o un amigo y dile que

33. El campo magnético de la Tierra induce cierto grado de
descubriste cuál es la respuesta a lo que durante siglos ha
magnetismo en la mayoría de los objetos de hierro que
sido un misterio: la naturaleza de la luz. Cuéntale cómo
están a tu alrededor. Con una brújula puedes ver que las
la luz se relaciona con la electricidad y el magnetismo.
latas de alimento de tu alacena tienen polos norte y sur.
32. Con un trozo de alambre, haz una bobina; quizás puedes
Cuando pasas la brújula de su parte inferior a la parte
enrollarla holgadamente alrededor del tubo de cartón de
superior, puedes identificar con facilidad sus polos. Marca
un rollo de papel de baño vacío. Quita el tubo. Une cada
los polos N y S. Luego voltea las latas de cabeza y observa
extremo del alambre a un galvanómetro. Mueve un imán
cuántos días tardan en invertir sus polos. Explica a tus
de ida y vuelta dentro de la bobina y observa el movimien-
amigos por qué los polos se invierten.
to de la aguja del galvanómetro. Luego aumenta el número
34. Suelta un pequeño imán de barra por un tubo verti-
de espiras y de nuevo observa la lectura del galvanómetro.
cal de plástico y observa su rapidez de caída. Luego
Esto es en especial interesante si tienes imanes de diferentes
haz lo mismo con un tubo de cobre. ¡Hala! ¿Por qué la
intensidades con los que puedas jugar.

diferencia?

S U S T I T U Y E Y L I S T O (F A M I L I A R I Z A C I Ó N C O N E C U A C I O N E S) Voltaje primario

Voltaje secundario

Relación del transformador =

=

Número de vueltas en el primario

Número de vueltas en el secundario

35. El primario de un transformador conectado a 120 V tiene

36. El primario de un transformador conectado a 120 V tiene

10 vueltas. El secundario tiene 100 vueltas. Demuestra

100 vueltas. El secundario tiene 10 vueltas. Demuestra

que el voltaje de salida es 1,200 V. Éste es un transforma-

que el voltaje de salida es 12 V. Éste es un transformador

dor elevador.

reductor.

P I E N S A Y R E S U E L V E (A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 37. Una consola de videojuegos necesita 6 V para funcionar

40. Si la corriente de salida para el transformador del proble-

de manera correcta. Un transformador permite que el

ma anterior es 1.8 A, demuestra que la corriente de entra-

dispositivo pueda alimentarse de un tomacorriente de

da es 0.36 A.

120 V. Si el primario tiene 500 vueltas, demuestra que el

41. Un transformador tiene una entrada de 6 V y una salida

secundario debe tener 25 vueltas.

de 36 V. Si la entrada cambia a 12 V, demuestra que la

38. Un tren eléctrico de juguete necesita 6 V para funcionar.

salida sería 72 V.

Cuando se conecta a un circuito doméstico de 120 V, se

42. Un transformador ideal tiene 50 vueltas en su primario y

necesita un transformador. Si el embobinado primario del

250 vueltas en su secundario. Al primario se conecta una

transformador tiene 360 vueltas, demuestra que el embobi-

CA de 12 V. Demuestra que (a) en el secundario está dispo-

nado secundario debe tener 18 vueltas.

nible una CA de 60 V; (b) en un dispositivo de 10 Ω conec-

39. Un transformador para una laptop convierte una entrada

tado al secundario hay 6 A de corriente, y (c) la potencia

de 120 V en una salida de 24 V. Demuestra que el embo-

suministrada al primario es 360 W.

binado primario tiene cinco veces más vueltas que el

43. Las señales de neón necesitan aproximadamente 12,000 V

embobinado secundario.

para su funcionamiento. Considera el transformador de una

señal de neón que opera en líneas de 120 V. ¿Cuántas vuel-

tas de más debe haber en el secundario que en el primario?

44. Una potencia de 100 kW (105 W) se suministra al otro cuidado. Este cambio de voltaje es a lo largo de cada lado de la ciudad mediante un par de líneas de transmi- línea, no entre las líneas.) (c) Demuestra que la potencia sión, entre las cuales el voltaje es de 12,000 V. (a) Usa la que se disipa como calor en ambas líneas, en conjunto, fórmula P 5 IV para demostrar que la corriente en las es de 1.38 kW (distinto de la potencia suministrada a los líneas es de 8.3 A. (b) Si cada una de las dos líneas tiene consumidores). (d) ¿Cómo es que tus cálculos apoyan una resistencia de 10 Ω, demuestra que existe un cambio la importancia de subir los voltajes con transformadores de voltaje de 83 V a lo largo de cada línea. (Piensa con para la transmisión a larga distancia?

P I E N S A Y C L A S I F I C A (A N Á L I S I S)

45. Imanes de barra se mueven dentro de bobinas de alambre

46. Cada uno de los transformadores mostrados es activado en forma rápida e idéntica. El voltaje inducido en cada bobi- con 100 W, y todos tienen 100 vueltas en el primario. na provoca una corriente, como se indica en el galvanóme- El número de vueltas en cada secundario varía como se tro. Ignora la resistencia eléctrica en las espiras de la bobina indica.

y clasifica, de mayor a menor, la lectura en el galvanómetro.

espiras

espiras

vueltas

vueltas

vueltas

a. Clasifica las salidas de voltaje de los secundarios, de mayor a menor.

espiras

b. Clasifica las corrientes en los secundarios, de mayor a menor.

c. Clasifica las salidas de potencia en los secundarios, de mayor a menor.

P I E N S A Y E X P L I C A (S Í N T E S I S)

47. ¿Por qué en este capítulo la palabra cambio aparece con

cinta pasa por una pequeña bobina de alambre, ¿qué ocurre

tanta frecuencia?

en la bobina? ¿Cuál es la aplicación práctica de esto?

48. Una pastilla fonocaptora común para una guitarra consiste

57. ¿Cómo difieren la dirección de la fuerza magnética y sus

en una bobina de alambre alrededor de un pequeño imán

efectos entre el efecto motor y el efecto generador, como

permanente, como se describe en la Figura 25.5. ¿Por qué

se muestra en la Figura 25.7?

este tipo de pastilla fonocaptora no funcionará con cuerdas

58. Cuando giras con la mano el eje de un motor eléctrico,

de nailon?

¿qué ocurre en el interior de las bobinas de alambre?

49. ¿Por qué un núcleo de hierro aumenta la inducción mag-

59. Tu amigo dice que, si giras con la mano el eje de un

nética de una bobina de alambre?

motor CD, el motor se convierte en un generador CD.

50. ¿Por qué la armadura y los devanados de campo de un

¿Estás de acuerdo o en desacuerdo?

motor eléctrico por lo general se devanan sobre un núcleo

60. ¿La salida de voltaje aumenta cuando un generador se

de hierro?

hace girar más rápido? Defiende tu respuesta.

51. ¿Por qué la armadura de un generador es más difícil de

61. Si colocas un anillo metálico en una región donde un

girar cuando se conecta a un circuito y se suministra

campo magnético alterna en forma rápida, el anillo

corriente eléctrica?

puede ponerse muy caliente al tacto. ¿Por qué?

52. ¿Por qué un motor también tiende a actuar como un

62. Un mago coloca un anillo de aluminio sobre una mesa

generador?

con un electroimán oculto bajo ella. Cuando el mago

53. ¿Un ciclista viajará más lejos si la lámpara conectada al

dice “abracadabra” (y presiona un interruptor que activa

generador de su bicicleta se apaga? Explica.

una corriente que fluye por la bobina bajo la mesa), el

54. Cuando un automóvil se mueve sobre una ancha espira de

anillo salta en el aire. Explica este “truco”.

alambre cerrada, incrustada en la superficie del camino, ¿se

63. En una de las fotografías al inicio del capítulo, Jean

altera el campo magnético de la Tierra dentro de la espira?

Curtis pregunta a sus alumnos por qué el anillo de cobre

¿Se produce un pulso de corriente? ¿Puedes citar una aplica-

levita alrededor del núcleo de hierro del electroimán.

ción práctica de esto en una intersección transitada?

¿Cuál es la explicación, y esto involucra CA o CD?

55. En el área de seguridad, las personas caminan a través de

64. ¿Cómo podría encenderse una bombilla cerca de un

una gran bobina de alambre y a través de un débil campo

electroimán, mas no en contacto con él? ¿Se necesita CA

magnético CA. ¿Cuál es el resultado de que un pequeño

o CD? Defiende tu respuesta.

trozo de metal en una persona altere un poco el campo

65. Un trozo de alambre se dobla en una espira cerrada y

magnético de la bobina?

un imán se inserta en él, lo que induce un voltaje y, en

56. Un trozo de cinta plástica recubierta con óxido de hierro está

consecuencia, una corriente en el alambre. Un segundo

magnetizada más en algunas partes que en otras. Cuando la

trozo de alambre, el doble de largo, se dobla en dos

C A PÍ T U LO 25 R E V ISI Ó N

483

espiras de alambre, y un imán se inserta de igual forma

1 A

en él. Se induce el doble de voltaje, pero la corriente es la

misma que la producida en la espira sencilla. ¿Por qué?

CA 120 V

66. Dos bobinas de alambre, separadas Primario Secundario

pero similares, se montan una

100 vueltas 10 vueltas 100 vueltas

cerca de la otra, como se muestra.

La primera bobina se conecta a

77. En el circuito mostrado, ¿cuán- CD 120 V

una batería. La segunda bobina

tos volts pasan a través del

se conecta a un galvanómetro. (a)

medidor y cuántos amperes

1 A

¿Cómo responde el galvanómetro

fluyen a través de él?

100 vueltas

cuando se cierra el interruptor en el

78. ¿Cómo responderías la

primer circuito? (b) Después de cerrarse, ¿cómo responde

pregunta anterior si la entrada fuera 12 V de CA?

el medidor cuando la corriente es estable? (c) ¿Cómo

79. ¿Un transformador eficiente puede incrementar la ener-

responde el medidor cuando se abre el interruptor?

gía? Defiende tu respuesta.

67. ¿Por qué se inducirá más voltaje con el aparato mostrado

80. Si un imán de barra se suelta en el interior de una bobina

antes, si en las bobinas se inserta un núcleo de hierro?

de alambre de alta resistencia, éste frenará. ¿Por qué?

68. ¿Por qué el transformador no funcionará si usas CD?

81. Se sabe que la fuente de una onda sonora es un objeto en

69. ¿Cómo se compara la corriente en el secundario de

vibración. ¿Cuál es la fuente de una onda electromagnética?

un transformador, con la corriente en el primario, cuando

82. Sin imanes en el vecindario, ¿por qué razón fluirá corriente

el voltaje secundario es el doble que el voltaje primario?

en una gran bobina de alambre sacudida en el aire?

70. ¿En qué sentido un transformador puede considerarse una

83. ¿Qué le hace una onda de radio incidente a los electrones

palanca eléctrica? ¿Qué multiplica? ¿Qué no multiplica?

en una antena receptora?

71. ¿Cuál es la principal diferencia entre un transformador

84. ¿Cómo supones que se compara la frecuencia de una

elevador y un transformador reductor?

onda electromagnética, con la frecuencia de los electrones

72. ¿Por qué suele escucharse un zumbido cuando un

que pone a oscilar en una antena receptora?

transformador está funcionando?

85. Un amigo dice que el cambio de los campos eléctrico y mag-

73. ¿Por qué un transformador no funciona con corriente

nético hace que éstos se generen mutuamente y que esto da

directa? ¿Por qué se necesita CA?

origen a luz visible cuando la frecuencia del cambio coincide

74. ¿Por qué es importante que el núcleo de un

con las frecuencias de la luz. ¿Estás de acuerdo? Explica.

transformador pase a través de ambos embobinados?

86. ¿Las ondas electromagnéticas existirían si los campos

75. ¿Los embobinados primario y secundario en un transformador

magnéticos variables pudieran producir campos eléctricos

están físicamente unidos, o hay espacio entre los dos? Explica.

pero los campos eléctricos variables, a su vez, no pudieran

76. Una fuente CA de 120 volts activa el circuito que se

producir campos magnéticos? explica.

muestra. ¿Cuántos volts pasan por la bombilla y cuántos

amperes fluyen por ella?

P I E N S A Y D I S C U T E (E V A L U A C I Ó N)

87. La esposa de Joseph Henry donó parte de su vestido de bodas de seda para cubrir los alambres de los electroimanes de Joseph. ¿Cuál fue el propósito del recubrimiento de seda?

88. Un determinado detector de sismos simple consiste en una pequeña caja firmemente anclada a tierra. Suspendido dentro de la caja hay un imán masivo, rodeado por bobinas de alambre estacionarias unidas a la caja. Para explicar cómo funciona este dispositivo, aplica dos importantes principios de física: uno del Capítulo 2 y el otro de este capítulo.

89. Una sierra eléctrica que funciona con rapidez normal extrae una corriente relativamente pequeña. Pero si un pedazo de madera aserrado se atasca y el eje del motor no gira, la corriente aumenta en forma rápida. ¿Por qué? (Tal amortiguamiento magnético se utiliza en varios dispositivos prácticos.)

92. Este ejercicio es similar al anterior. ¿Por qué un imán de barra caerá más lento y alcanzará una velocidad terminal en un tubo vertical de cobre o aluminio, pero no en un tubo de cartón?

93. Si bien el cobre y el aluminio no son magnéticos, ¿por qué una hoja de alguno de estos metales es más difícil de pasar entre los polos de un imán que una hoja de cartón?

94. Una barra metálica, pivoteada en un extremo, oscila libremente en ausencia de un campo magnético. Pero cuando oscila entre los polos de un imán, sus oscilaciones se amortiguan en forma rápida. ¿Por qué? (Tal amortiguamiento magnético se utiliza en varios dispositivos prácticos.)

95. El ala metálica de un avión actúa como un "alambre" que te aumenta de manera sorprendente y el motor se sobrecalien- vuela a través del campo magnético de la Tierra. Entre las ta. ¿Por qué?

puntas de las alas se induce un voltaje, y una corriente fluye 90. Tu amigo dice que, de acuerdo con la ley de Ohm, un alto a lo largo del ala, pero sólo durante breve tiempo. ¿Por qué la voltaje produce una alta corriente. Luego, tu amigo pregunta: corriente se detiene aun cuando el avión sigue volando a tra- "entonces, en una línea de transmisión, ¿cómo puede trans- vés del campo magnético de la Tierra?

mitirse la potencia a alto voltaje y baja corriente?". ¿Cuál es tu 96. ¿Qué está mal con este esquema? Para generar electricidad respuesta iluminadora?

sin combustible, arregla un motor para que haga funcionar 91. Tu instructor de física suelta un imán por un largo tubo de un generador que produzca electricidad que se incremente cobre vertical y el imán se mueve de manera lenta en compa- con transformadores, de modo que el generador pueda hacer ración con la caída de un objeto no magnetizado. Ofrece una funcionar el motor y, de manera simultánea, suministre elec- explicación.

tricidad para otros usos.

EL EC T R I CI DA D Y M AG N E T I SM O

P A R T E C I N C O Examen de práctica de opción múltiple

Elige la MEJOR respuesta a cada una de las siguientes:

16. En un circuito en serie, si la corriente en una lámpara es 2 A, la corriente en la lámpara junto a ella es

1. La fuerza de atracción eléctrica entre un electrón y un protón es

(a) la mitad, 1 A. (c) Depende de cuál lámpara esté más cerca

mayor sobre el

de la batería.

(a) protón.

(b) electrón.

(b) 2 A.

(d) No hay suficiente información para decirlo.

(c) Ninguno; ambas son iguales.

17. A medida que más lámparas se conectan en paralelo en un cir-

2. Cuando te cepillas el cabello y quitas electrones del mismo, la

cuito, la corriente en la fuente de poder

carga de tu cabello se vuelve

(a) aumenta. (c) permanece igual.

(a) positiva. (c) Ambas.

(b) disminuye. (d) No hay suficiente información para decirlo.

(b) negativa. (d) Ninguna de las anteriores.

18. En un circuito de dos lámparas en paralelo, si la corriente en

3. De acuerdo con Coulomb, un par de partículas cargadas colo-

una lámpara es 2 A, la corriente en la otra lámpara es

cadas el doble de cerca una de otra experimenta una fuerza

(a) aproximadamente 1 A.

(a) el doble de intensa.

(c) la mitad de intensa.

(b) 2 A.

(b) cuatro veces más intensa. (d) un cuarto de intensa.

(c) Depende de cuál lámpara esté más cerca de la batería.

4. Cuando compras una tubería en un almacén, el agua no está

(d) No hay suficiente información para decirlo.

incluida. Cuando compras alambre de cobre, los electrones

19. Un electrón puede acelerarse mediante

(a) debes suministrarlos tú.

(a) un campo eléctrico. (c) Ambos.

(b) están incluidos en el alambre.

(b) un campo magnético. (d) Ninguno de los anteriores.

(c) pueden caerse… de ahí el aislamiento.

20. Las líneas de campo magnético que rodean un alambre porta-

(d) Ninguno de los anteriores.

dor de corriente forman

5. Inmediatamente después de que dos partículas cargadas separa-

(a) círculos.

(c) corrientes parásitas.

das se sueltan desde el reposo, ambas aumentan su rapidez. En (b) líneas radiales. (d) bucles de energía.

consecuencia, el signo de la carga de las partículas es

21. Una fuerza magnética puede actuar sobre un electrón aun cuando

(a) el mismo.

(c) Cualquiera de éstos.

(a) esté en reposo.

(b) opuesto.

(d) Se necesita más información.

(b) se mueva paralelo a las líneas del campo magnético.

6. Inmediatamente después de que dos partículas cargadas separa-

(c) Ambos.

das se sueltan desde el reposo, ambas aumentan su aceleración.

(d) Ninguno de los anteriores.

En consecuencia, el signo de la carga de las partículas es

22. Una fuerza magnética que actúa sobre un haz de electrones

(a) el mismo.

(c) Cualquiera de éstos.

puede cambiar su

(b) opuesto.

(d) Se necesita más información.

(a) dirección.

(c) Ambos.

7. El campo eléctrico entre un par de placas paralelas con carga opuesta (b) energía.

(d) Ninguno de los anteriores.

(a) se hace más débil con la distancia dentro de las placas.

23. Un galvanómetro puede calibrarse para leer

(b) sigue la ley del inverso al cuadrado.

(a) corriente eléctrica. (c) Ambos.

(c) Ambos.

(b) voltaje eléctrico.

(d) Ninguno de los anteriores.

(d) Ninguno de los anteriores.

24. Un motor y un generador son

8. Un capacitor puede almacenar

(a) dispositivos similares.

(c) formas de transformadores.

(a) carga.

(c) Ambos.

(b) dispositivos muy diferentes. (d) fuentes de energía.

(b) energía.

(d) Ninguno de los anteriores.

25. Los detectores de metales por los que pasan las personas en los

9. El campo eléctrico dentro del domo de un generador Van de

aeropuertos funcionan de acuerdo con

Graaff es cero cuando el domo está

(a) la ley de Ohm.

(c) la ley de Coulomb.

(a) cargado.

(c) Cualquiera de éstos.

(b) la ley de Faraday.

(d) las leyes de Newton.

(b) descargado.

(d) Ninguno de los anteriores.

26. Si cambias el campo magnético en una espira de alambre cerra-

10. La energía potencial de un resorte comprimido y la energía

da, lo que se crea en la espira es

potencial de un objeto cargado dependen ambas de

(a) una corriente.

(c) un campo eléctrico.

(a) el trabajo realizado sobre el os. (c) Ambos.

(b) un voltaje.

(d) Todos los anteriores.

(b) el movimiento.

(d) Ninguno de los anteriores.

27. En una espira de alambre se inducirá un voltaje cuando el

11. Para recibir un choque eléctrico debe haber

campo magnético dentro de dicha espira

(a) una corriente en una dirección.

(a) cambie.

(b) presencia de humedad.

(b) se alinee con el campo eléctrico.

(c) alto voltaje y baja resistencia corporal.

(c) esté en ángulo recto con el campo eléctrico.

(d) diferencia de voltaje a través de parte o todo tu cuerpo.

(d) se convierta a energía magnética.

12. Un resistor de 10 Ω porta 10 A. El voltaje a través del resistor es
28. Un transformador elevador en un circuito eléctrico puede elevar

(a) 0.

(c) 10 V.

(a) el voltaje.

(c) Ambos.

(b) más que 0 pero menos que 10 V. (d) más que 10 V.

(b) la energía.

(d) Ninguno de los anteriores.

13. Si la corriente en el filamento de una lámpara es de 3 A, la

29. Comparada con la entrada de potencia, la salida de potencia de

corriente en el alambre de conexión es

un transformador ideal es

(a) menos que 3 A. (c) más que 3 A.

(a) mayor.

(b) 3 A.

(d) No hay suficiente información para decirlo.

(b) menor.

14. La diferencia entre CD y CA en los circuitos eléctricos es que,

(c) la misma.

en la CD, las cargas fluyen

(d) Cualquiera de los anteriores.

(a) de manera estable en una dirección. (c) de ida y vuelta.

30. Electricidad y magnetismo se conectan para formar

(b) en una dirección.

(d) Todas las anteriores.

(a) masa.

(c) sonido de ultraalta frecuencia.

15. A medida que más lámparas se conectan a un circuito en serie,

(b) energía.

(d) luz.

la corriente en la fuente de poder

(a) aumenta.

(c) permanece igual.

Después de hacer elecciones razonadas, y discutirlas con tus amigos,
(b) disminuye.

(d) Ninguno de los anteriores.

encuentra las respuestas en las páginas S-1.

P A R T E S E I S

Luz

Qué bel o es que fotones energéticos de la luz solar estimulen vibraciones de incontables electrones en la estructura molecular de esta hoja. Algunas de las vibraciones producen calor, en tanto que otras sacan nuevos fotones, lo que revela la transparente y delicada estructura de la hoja con intrincado detal e. Y los fotones no vibran

a cualquier frecuencia, ¡caramba! Se contonean a un ritmo promedio de

6 × 1014 vibraciones por segundo, ¡razón por la cual la hoja es verde!

26 12

C A P Í T U L O 2 6

Propiedades

de la luz

3

26.1 Ondas electromagnéticas

4

26.2 Velocidad de una onda electromagnética

26.3 El espectro electromagnético

26.4 Materiales transparentes

26.5 Materiales opacos

26.6 Viendo la luz: el ojo

5

1 Vista desde la estación espacial MIR de un eclipse solar en la Tierra. 2 Bob y Leslie Abrams (mi hija) ayudan a Dave Wall con un experimento de óptica. 3 Las manchas de luz sobre la pared, el suelo y sobre el autor del manual de laboratorio Dean Baird son imágenes del Sol proyectadas a través de pequeñas aberturas entre las hojas de los árboles cercanos. 4 Durante un eclipse parcial de Sol (cuando la Luna cubre parte del Sol en el cielo), las imágenes solares son crecientes. 5 Durante un eclipse anular, la Luna se alinea con el Sol, pero no lo cubre por completo, lo que resulta en círculos solares rara vez vistos, como lo demuestra Paul Doherty durante el eclipse anular de 2012, que transitó por el occidente de Estados Unidos.

que sus clases eran poco exigentes y se sumergió en el estudio privado durante su tiempo libre en la universidad, y

James Clerk Maxwell, quien nació en 1831, fue un

matemático y físico teórico escocés. Sus padres no se

conocieron ni casaron sino hasta entrados los 30 años

en particular durante sus visitas a casa. Ahí experimentó

de edad, cosa muy rara en la época, y su madre tenía

con aparatos químicos y electromagnéticos improvisados.

casi 40 cuando nació James. Fue el único hijo sobrevivien-

Su principal preocupación en esa época era la luz pola-

te, pues su hermana mayor murió en la infancia.

rizada. Construyó bloques de gelatina y los sometió a

Maxwell tuvo una curio-

varios esfuerzos, y con un par de prismas polarizadores

sidad insaciable desde muy

observó las franjas coloreadas que aparecían en la gelatina.

temprana edad. Su madre Maxwell había descubierto la fotoelasticidad, un medio reconoció su potencial y para determinar la distribución de esfuerzos dentro de asumió la responsabilidad estructuras físicas.

de su educación inicial, que

A los 18, Maxwell escribió dos artículos para la Royal

en la época victoriana era Society de Edimburgo. Aunque el trabajo era impresio-una tarea que recaía, sobre

nante, como con su ensayo escolar sobre las curvas ovales,

todo, en la mujer de la casa.

se le consideró demasiado joven para pararse en el estrado

Por desgracia, ella murió de

y hacer la presentación él mismo. Los ensayos de Maxwell

cáncer abdominal cuando fueron presentados por su tutor.

Maxwell tenía sólo ocho

En octubre de 1850, ya como un matemático con-

años de edad. Entonces

sumado, Maxwell abandonó Escocia para dirigirse a

su educación la supervisó la University of Cambridge y pronto se unió al Trinity su padre, quien contrató a un tutor de 16 años de edad

College, donde en 1854 se graduó con un título en mate-

para el joven Maxwell. El tutor lo trataba con severi-

máticas. Maxwell decidió permanecer en Trinity después

dad y lo amonestaba por ser lento y caprichoso. Después

de graduarse y, aparte de las asesorías y labores docentes,

de que su padre despidió al tutor, Maxwell fue enviado a

se dedicó a sus intereses científicos en áreas como color,

la prestigiosa Academia de Edimburgo.

hidrostática, óptica y los anillos de Saturno, todo a su pro-

Maxwell, con 10 años de edad, criado en soledad en la

pio ritmo.

finca rural de su padre, no se adaptó a la escuela. Sin lugar

En 1859, después de mudarse al Marischal College, en

en la clase de primer año, fue obligado a incorporarse a la

Aberdeen, Escocia, Maxwell se casó con Katherine Mary

clase de segundo año, con compañeros un año más gran-

Dewar, la hija del rector del colegio. En ese mismo año,
des que él. Para los demás chicos, la manera de conducirse
ganó un premio por concluir que los anillos de Saturno
y el acento de Galloway eran rústicos, y cuando llegó en
consistían en pequeñas partículas, una conclusión verifi-
su primer día de clases vistiendo zapatos y túnica hechos
cada más de un siglo después, en la era espacial. Maxwell
en casa se ganó el nada agradable apodo de "tontito". Sin
tuvo un episodio casi letal de viruela poco después y se
embargo, Maxwell nunca pareció resentir el epíteto, y lo
dirigió al sur, a Londres, con su esposa. Aceptó un puesto
soportó sin quejas durante muchos años.
en el King's College, lo que resultó ser el periodo más
A una edad temprana, Maxwell quedó fascinado por
productivo de su carrera. Ahí mostró la primera fotografía
la geometría. Su trabajo académico permaneció común y
a color del mundo y desarrolló ideas acerca de la viscosi-
corriente hasta que, a la edad de 13 años, ganó la medalla
dad de los gases. Sin embargo, su logro más significativo
matemática de la escuela y los primeros lugares en inglés
fue el desarrollo de la teoría electromagnética, que sinte-
y poesía. A los 14, Maxwell escribió un ensayo que descri-
tizaba en una teoría consistente todas las observaciones,
bía un medio mecánico para dibujar curvas matemáticas

experimentos y ecuaciones de electricidad, magnetismo e

con un pedazo de cordel y las propiedades de las cur-

incluso óptica que antes no guardaban ninguna relación.

vas con dos o más focos. Su genio quedó demostrado en

Alrededor de 1862, calculó que la rapidez de propagación

este trabajo de las "curvas ovales", que fue presentado a

de un campo electromagnético es aproximadamente la

la Royal Society de Edimburgo, mas no por Maxwell. rapidez de la luz. Escribió: "Apenas podemos evitar con-Debido a que era considerado demasiado joven, confió el

cluir que la luz consiste en las ondulaciones transversales

ensayo a un profesor de filosofía natural de la Universidad

del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctri-

de Edimburgo.

cos y magnéticos".

Maxwell dejó la Academia de Edimburgo a los 16 años

Después de la obra de Newton, que primero unificó

y comenzó a tomar clases en la Universidad de Edimbur-

la mecánica, la obra de Maxwell sobre el electromagne-

go. Tuvo la oportunidad de asistir a Cambridge después de

tismo se ha llamado la "segunda gran unificación en físi-

su primer curso, pero prefirió concluir sus estudios de pre-

ca". Maxwell murió de cáncer abdominal a los 48 años

grado en la universidad local. Pronto, Maxwell consideró

de edad.

PA R T E SEI S

LU Z

26.1 Ondas electromagnéticas

Recuerda del Capítulo 25 que Maxwell descubrió que la luz es la oscilación de los La luz es la única cosa que se ve.

El sonido es la única cosa que se

campos eléctrico y magnético. Sabes que si sacudes el extremo de una varita en escucha.

agua calma, producirás ondas sobre la superficie del agua. Maxwell enseñó que, si del mismo modo sacudes una barra con carga eléctrica en el espacio vacío, producirás ondas en el espacio. Los campos eléctrico y magnético vibratorios se regeneran mutuamente y constituyen una onda electromagnética, que emana (sale) de la carga en vibración. Resulta que sólo hay una rapidez para la cual los campos eléctrico y magnético permanecen en equilibrio perfecto, lo que refuerza a cada uno conforme portan energía por el espacio. A continuación verás por qué esto es así.

Campo

eléctrico

Campo magnético

F I G U R A 2 6 . 1

Sacude un objeto con carga eléctrica y

producirás una onda electromagnética.

Dirección de

movimiento de la onda

F I G U R A 2 6 . 2

Los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética son perpendiculares entre sí y perpendiculares con respecto a la dirección de movimiento de la onda.

26.2 Velocidad de una onda electromagnética

El estudio de la luz comienza

con la investigación de sus

A diferencia de otros objetos en movimiento, las ondas electromagnéticas que viajan propiedades electromagnéticas.

por el espacio libre nunca cambian de rapidez. Esto tiene que ver con la inducción En el Capítulo 27 estudiarás su

electromagnética y la conservación de energía. Si la luz frenara, su campo eléctrico va-apariencia: el color. En el Capítulo

riable generaría un campo magnético más débil, el cual, a su vez, generaría un campo 28 aprenderás cómo se comporta

eléctrico más débil, y así sucesivamente, hasta que la onda muriera. Se perdería energía la luz: cómo se refleja y refracta.

y nada se transportaría de un lugar a otro. De modo que la luz no puede viajar más Luego conocerás su naturaleza

ondulatoria en el Capítulo 29,

lento de lo que lo hace.

y su naturaleza cuántica, en los

Si la luz acelerara, el campo eléctrico variable generaría un campo magnético más Capítulos 30 y 31.

intenso, el cual, a su vez, generaría un campo eléctrico más intenso, y así sucesivamente; un crescendo de intensidad de campo siempre creciente y de energía siempre creciente, lo que, por supuesto, infringe la ley de conservación de la energía. Sólo a una rapidez la inducción mutua continúa de manera indefinida, y transporta energía hacia Maxwell, "con su propio pensa-adelante sin pérdida o ganancia. A partir de sus ecuaciones de inducción electromag-miento", calculó la rapidez de la

nética, Maxwell calculó el valor de esta rapidez crucial y descubrió que era de 300,000

luz. Unos 100 años después, en

kilómetros por segundo. En sus cálculos, utilizó sólo las constantes en sus ecuaciones 1969, millones de personas que

que fueron determinadas mediante experimentos sencillos de laboratorio con campos observaban por televisión el primer

eléctricos y magnéticos. No usó la rapidez de la luz. ¡Él encontró la rapidez de la luz!

aterrizaje en la Luna escucharon las

conversaciones entre los astro-

Maxwell pronto se dio cuenta de que había descubierto la solución a uno de los más nautas y el control de misión en la

grandes misterios del Universo: la naturaleza de la luz. Descubrió que la luz es tan sólo Tierra. Cuando los observadores

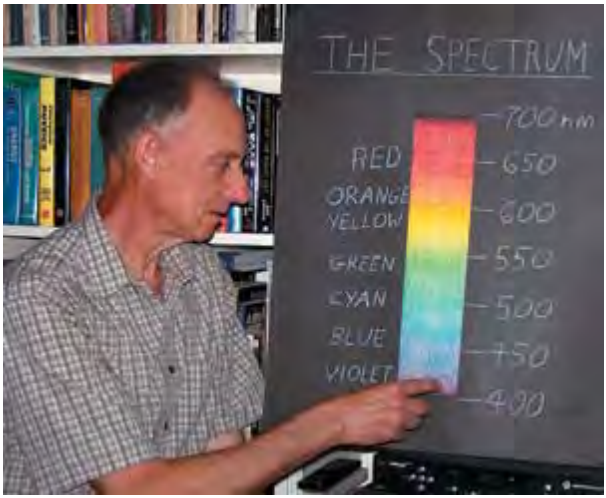
radiación electromagnética dentro de un rango de frecuencia particular, 4.3 3 1014 a percibieron una clara demora

7 3 1014 vibraciones por segundo. Tales ondas activan la "antena eléctrica" en la retina temporal entre los mensajes, escu-del ojo. Las ondas de frecuencia más baja parecen rojas, y las ondas con frecuencia más charon el efecto de la rapidez de

Maxwell "con sus propios oídos".

alta parecen violetas.1 Maxwell se dio cuenta, al mismo tiempo, de que la radiación electromagnética de cualquier frecuencia se propaga con la misma rapidez que la luz.

1Es habitual describir el sonido y las ondas de radio por su frecuencia y la luz por su longitud de onda. Sin embargo, en este libro, se prefiere el concepto único de frecuencia para describir la luz.



C A PÍ T U LO 26 PRO P I EDA D ES D E L A LU Z

489

P U N T O D E C O N T R O L

¿De qué principio central en física es una consecuencia la invariable rapidez de las ondas electromagnéticas en el espacio?

SCREENCAST: Rapidez de la luz

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

La conservación de la energía.

26.3 El espectro electromagnético

En el vacío, todas las ondas electromagnéticas se mueven con la misma rapidez y difieren una de otra en su frecuencia. La clasificación de las ondas electromagnéticas de acuerdo con su frecuencia es el espectro electromagnético (Figura 26.3). Se han detectado ondas electromagnéticas con una frecuencia de apenas 0.01 hertz (Hz). Las ondas electromagnéticas con frecuencias de varios miles de hertz (kHz) se clasifican como ondas de radio de muy baja frecuencia. Un millón de hertz (MHz) se encuentra en medio de la banda Luz

Infrarrojo

visible

Rayos X

Ondas de radio

Microondas

Ultravioleta Rayos gamma

104

106

108

1010

1012

1014

1016

1018

1 millón

1 mil millones

1 billón

100 billones 1 millón de billones

Frecuencia en hertz

F I G U R A 2 6 . 3

El espectro electromagnético es un intervalo continuo de ondas que se extienden desde las ondas de radio hasta los rayos gamma. Los nombres descriptivos de las secciones son sólo una clasificación histórica, porque todas las ondas son iguales en naturaleza y difieren principalmente en su frecuencia y su longitud de onda; todas viajan con la misma rapidez.

de radio AM. La banda de ondas de televisión de muy alta frecuencia (VHF) comienza en alrededor de 50 MHz, y las ondas de radio FM están entre 88 MHz y 108 MHz. (a) Los teléfonos celulares funcionan en 800 MHz o en 1,900 MHz. Luego vienen las frecuencias ultraaltas (UHF), seguidas de las microondas, más allá de las cuales están las ondas infrarrojas, que suelen denominarse "ondas de calor". Todavía más lejos está la luz visible, que constituye menos de una millonésima del 1% del espectro electromagnético medido. La frecuencia más baja de luz visible para tus ojos parece roja. Las frecuencias más altas de luz visible, que tienen casi el doble de frecuencia de la luz roja, parecen violetas. Las frecuencias todavía más altas son ultravioletas. Estas ondas de frecuencia más alta producen quemaduras solares. Las frecuencias más altas que rebasan las ultravioleta están en las regiones de los rayos X y los rayos gamma. No hay fronteras precisas entre las regiones, que en realidad se traslapan entre sí. El espectro se divide en estas regiones arbitrarias para clasificarlas.

Los conceptos y relaciones abordados antes en el estudio del movimiento ondulatorio (b) (revisa el Capítulo 19) se aplican aquí. Recuerda que la frecuencia de una onda es la misma que la

frecuencia de la fuente vibratoria que crea la onda. Del mismo modo, la fre- F I G U R A 2 6 . 4

cuencia de una onda electromagnética cuando vibra por el espacio es idéntica a la frecuen - (a) Bruce Novak creó este auxiliar cia de la carga eléctrica oscilatoria que la genera.2 Diferentes frecuencias corresponden pedagógico para mostrar a sus alumnos de qué manera los colores del espectro se

2

mezclan de uno al otro. (b) Él fotogra-

Ésta es una regla de la física clásica, válida cuando las cargas oscilan sobre dimensiones que son grandes comparadas con el tamaño de un solo átomo (por ejemplo, en una antena de radio). La física cuántica permite fió este espectro, que muestra mejor la excepciones. La radiación emitida por un solo átomo o molécula puede diferir en frecuencia de la frecuencia mezcla de colores.

de la carga oscilatoria dentro del átomo o molécula.

LU Z

a diferentes longitudes de onda: ondas con frecuencias bajas tienen longitudes de onda Roja

largas, y ondas con frecuencias altas tienen longitudes de onda cortas. Por ejemplo, dado que la rapidez de la onda es 300,000 km/s, una carga eléctrica que oscila una vez por segundo (1 Hz) producirá una onda con una longitud de onda de 300,000 km. Esto es así Verde

porque en 1 segundo sólo se genera una longitud de onda. Si la frecuencia de oscilación fuese 10 Hz, entonces en 1 segundo se formarían 10 longitudes de onda, y la longitud de onda correspondiente sería de 30,000 km. Una frecuencia de 10,000 Hz produciría una Violeta

longitud de onda de 30 km. De modo que, cuanto mayor sea la frecuencia de la carga F I G U R A 2 6 . 5

que vibra, más corta será la longitud de onda de la energía radiante.3

Longitudes de onda relativas de luz roja,

Uno tiende a pensar en el espacio como vacío, pero sólo porque no es posible ver los verde y violeta. La luz violeta tiene casi

montajes de ondas electromagnéticas que permean cada región de su entorno. Desde el doble de frecuencia que la luz roja y la

luego, algunas de estas ondas se ven como luz. Estas ondas constituyen sólo una mi-mitad de longitud de onda.

croporción del espectro electromagnético. Tú no eres consciente de las ondas de radio y de telefonía celular que te engullen en todo momento. Los electrones libres en cada pedazo de metal sobre la superficie de la Tierra bailan de manera continua al ritmo de estas ondas. Se menean al unísono con los electrones que suben y bajan por una antena de transmisión. Un receptor de radio o televisión es simplemente un dispositivo que ordena y amplifica estas pequeñas corrientes. En todas partes existe radiación. La primera impresión del Universo es una de materia y vacío, pero en realidad el Universo es un denso mar de radiación ocupado sólo de manera ocasional por motitas de materia.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Es correcto decir que una onda de radio es una onda luminosa de baja frecuencia? ¿Y que una onda de radio también es una onda sonora?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

Sí y no. Tanto una onda de radio como una onda de luz son ondas electromagnéticas emitidas por electrones en vibración; las ondas de radio tienen frecuencias más bajas que las ondas de luz, de modo que una onda de radio puede considerarse una onda luminosa de baja frecuencia (y una onda de luz, de igual forma, puede considerarse una onda de radio de alta frecuencia). Pero una onda sonora es una vibración mecánica de la materia y fundamentalmente es diferente de una onda electromagnética. De modo que una onda de radio, en definitiva, no es una onda sonora.

ANTENAS FRACTALES

Para obtener una recepción de calidad de ondas

aparecen en todos los niveles

electromagnéticas, una antena convencional debe tener un

de amplificación. Algunos

largo aproximado de un cuarto de longitud de onda. Es por

fractales que suelen observarse

esto que, en los primeros dispositivos móviles, tenían que sacarse las en la naturaleza son los copos de

antenas antes de usar el dispositivo. Nathan Cohen, un profesor de

nieve, las nubes, los relámpagos,

la Boston University, tenía problemas con una reglamentación de

las líneas costeras e incluso una

Boston que en la época prohibía el uso de antenas externas grandes

coliflor y un brócoli.

sobre los edificios. De modo que, para diseñar una pequeña antena,

La antena fractal, al igual que otros fractales, tiene una forma

dobló papel de aluminio en una forma fractal compacta (una figura

que se repite. Debido a su diseño autosimilar plegado, una

Van Koch; busca fractal en Internet). Funcionó. Entonces diseñó
antena fractal puede comprimirse y acomodarse en el cuerpo

y patentó muchas antenas fractales prácticas, como hizo Carles

del dispositivo; también puede funcionar de manera simultánea

Puente, un inventor de España. Ambos formaron compañías de

a diferentes frecuencias. En consecuencia, la misma antena puede

antenas fractales.

usarse para conversaciones con teléfono móvil, así como para

Los fractales son formas fascinantes que pueden separarse

navegación GPS.

en partes, cada una de las cuales es (o se aproxima a) una copia

Qué bueno que estos dispositivos quepan en tu bolsillo. ¡Que

reducida del conjunto. En cualquier fractal, formas similares

vivan las antenas fractales compactas!

3La relación es c 5 f , donde c es la rapidez de onda (constante), f es la frecuencia y es la longitud de onda.

C A PÍ T U LO 26 PRO P I EDA D ES D E L A LU Z

491

26.4 Materiales transparentes

Cuando la luz se transmite a través de la materia, algunos de los electrones de la materia son forzados a ponerse en vibración. De esta forma, las vibraciones en el emisor se transmiten a vibraciones en el receptor. Esto es similar a la forma en la que se transmite el sonido (Figura 26.6).

F I G U R A 2 6 . 6

De la misma manera como una onda

sonora puede forzar a un receptor sonoro

a ponerse en vibración, una onda de luz

puede forzar a los electrones de los mate-

riales para que se pongan en vibración.

La forma en que un material receptor responde cuando la luz incide sobre él depende de la frecuencia de la luz y de la frecuencia natural de los electrones en el material. La luz visible vibra a una frecuencia muy alta, más de 100 billones de veces por Los átomos son como diapasones

segundo (más de 1014 Hz). Para que un objeto cargado responda a estas vibraciones ópticos que resuenan a ciertas

ultrarrápidas, debe tener muy poca inercia. Puesto que la masa de los electrones es muy frecuencias.

pequeña, pueden vibrar a esta tasa.

Materiales como el vidrio y el agua permiten que la luz pase a través de ellos en líneas rectas. Se dice que son transparentes a la luz. Para entender cómo viaja la luz a través de un material transparente, imagina que los electrones en los átomos de los materia-Electrones

les transparentes estuvieran conectados a los núcleos mediante resortes (Figura 26.7).4

Cuando una onda de luz incide sobre ellos, los electrones se ponen en vibración.

Los materiales que son elásticos responden más a vibraciones con determinadas fre-Núcleo

cuencias que con otras (consulta el Capítulo 20). Las campanas tañen a una frecuencia atómico

particular, los diapasones vibran a una frecuencia particular, y así lo hacen los electrones de los átomos y moléculas. Las frecuencias naturales de vibración de un electrón de- F I G U R A 2 6 .7

penden de qué tan unido esté a su átomo o molécula. Diferentes átomos y moléculas Modelo de resortes de la luz. Los tienen diferentes "intensidades de resorte". Los electrones en los átomos de vidrio tie- electrones de los átomos en el vidrio nen una frecuencia de vibración natural en el rango del ultravioleta. Por tanto, cuando tienen ciertas frecuencias de vibración las ondas ultravioletas inciden sobre el vidrio, ocurre resonancia y la vibración de los naturales y se comportan como si estu-electrones se incrementa hasta alcanzar grandes amplitudes, de la misma manera como vieran conectados al núcleo atómico con empujar a alguien a la frecuencia resonante de un columpio genera una gran amplitud. resortes.

La energía recibida por cualquier átomo de vidrio se vuelve a emitir o se transmite a los átomos vecinos mediante colisiones. Los átomos resonantes en el vidrio pueden conservar la energía de la luz durante un tiempo muy largo (alrededor de 100 millonésimas de segundo). Durante este tiempo, el átomo realiza más de 1 millón de vibraciones, choca con átomos vecinos y cede su energía como calor. Por ende, el vidrio no es transparente VIDEO: Luz y materiales

a la luz ultravioleta.

transparentes

A frecuencias de onda más bajas, como las de la luz visible, los electrones en los átomos del vidrio se fuerzan a ponerse en vibración, pero a amplitudes más bajas. Los átomos conservan la energía durante un tiempo más breve, con menos posibilidad de Materiales diferentes tienen

colisión con los átomos vecinos y con menos energía que se transforme en calor. La ener-estructuras moleculares distintas

gía de los electrones en vibración se vuelve a emitir como luz. El vidrio es transparente a y, por tanto, absorben o reflejan

todas las frecuencias de la luz visible. La frecuencia de la luz reemitida que pasa de átomo luz de varios rangos espectrales de

a átomo es idéntica a la frecuencia de la luz que produjo la vibración en un principio.

modos diferentes.

Sin embargo, existe una leve demora temporal entre la absorción y la reemisión. Es esta 4Por supuesto que los electrones no están en realidad conectados con resortes. Su "vibración" es, propiamente, orbital, ya que se mueven alrededor del núcleo, pero el "modelo de resortes" permite entender la interacción de la luz con la materia. Los físicos diseñaron modelos conceptuales como éste para comprender la naturaleza, en particular a nivel submicroscópico. El valor de un modelo no radica en que sea "verdadero", sino en que sea útil. Un buen modelo no sólo es congruente con las observaciones y las explica, sino también predice lo que puede ocurrir. Si las predicciones del modelo son contrarias a lo que ocurre, entonces el modelo por lo general se perfecciona o se abandona. El modelo simplificado que se presenta aquí (el de un átomo cuyos electrones vibran como si estuvieran en resortes, con un intervalo de tiempo entre la absorción de energía y la reemisión de energía) es muy útil para entender cómo la luz pasa a través de los sólidos transparentes.

(a)

Vidrio

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

F I G U R A 2 6 . 8

Una onda de luz visible incidente sobre un panel de vidrio pone a vibrar a los átomos de vidrio, lo que produce una cadena de absorciones y reemisiones, por lo cual la energía luminosa atraviesa el material y sale del otro lado. Debido a la demora temporal entre absorciones y reemisiones, la luz viaja con más lentitud a través del vidrio que a través del espacio vacío.

demora temporal la que ocasiona una rapidez promedio más baja de la luz cuando atraviesa un material transparente (Figura 26.8).

La luz viaja con diferentes rapideces promedio a través de distintos materiales. Se dice rapideces promedio porque la rapidez de la luz en el vacío, ya sea espacio interestelar o el espacio entre las moléculas de un pedazo de vidrio, es una constante de 300,000 km/s.

A esto se le llama rapidez de la luz c.5 La rapidez de la luz en la atmósfera es un poco menor que en el vacío, pero por lo general se redondea a c. En el agua, la luz viaja a 75%

de su rapidez en el vacío, o 0.75 c. En el vidrio, la luz viaja a unos 0.67 c, según el tipo de F I G U R A 2 6 . 9

vidrio. En un diamante, la luz viaja a menos de la mitad de su rapidez en el vacío, sólo Cuando la bola elevada se suelta y

golpea a las otras, la bola que sale en el

0.41 c. Cuando la luz sale de estos materiales hacia el aire, viaja con su rapidez original c.

lado contrario no es la bola que inicia la

En el vidrio, las ondas infrarrojas, con frecuencias más bajas que las de la luz visible, transferencia de energía. Del mismo

no sólo hacen que vibren los electrones, sino que hacen vibrar átomos o moléculas en-modo, la luz que sale de un panel de

teras. Esta vibración aumenta la energía interna y la temperatura de la estructura, por vidrio no es la misma luz que incidió

lo cual a las ondas infrarrojas con frecuencia se les denomina ondas de calor. Por tanto, sobre el vidrio.

se observa que el vidrio es transparente a la luz visible, mas no a las luces ultravioleta o infrarroja.

F I G U R A 2 6 . 1 0

El vidrio bloquea tanto la luz infrarroja

Vidrio

Ultravioleta

como la ultravioleta, pero es transparen-

te a la luz visible.

Visible

Infrarroja

P U N T O D E C O N T R O L

¿La luz frena cuando

1. ¿Por qué el vidrio es transparente a la luz visible, pero opaco a la luz entra en el vidrio?

ultravioleta e infrarroja?

2. Supón que, mientras caminas por una sala de conferencias, haces varios altos momentáneos en el camino para saludar a las personas que están

“en tu longitud de onda”. ¿En qué se parece esto a la luz que viaja a

través del vidrio?

3. ¿En qué no se parece?

5El valor aceptado en la actualidad es 299,792 km/s, redondeado a 300,000 km/s.

(Esto corresponde a 186,000 mi/s.)

C A PÍ T U LO 26 PRO P I EDA D ES D E L A LU Z

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. Dado que la frecuencia natural de vibración de los electrones en el vidrio es la misma que la frecuencia de la luz ultravioleta, hay resonancia cuando las ondas ultravioleta inciden sobre el vidrio. La energía absorbida pasa hacia otros átomos en forma de calor, no se reemite como luz, lo que hace al vidrio opaco a las frecuencias del ultravioleta. En el intervalo de la luz visible, las vibraciones forzadas de los electrones en el vidrio son a amplitudes menores: las vibraciones son más sutiles, hay reemisión de luz (en lugar de generación de calor) y el vidrio es transparente. La luz infrarroja de frecuencia más baja hace que resuenen las moléculas enteras, en lugar de electrones; de nuevo, se genera calor y el vidrio es opaco a la luz infrarroja.

2. La rapidez promedio con la que caminas por la sala es menor de lo que sería si la sala estuviera vacía porque te demoras cada vez que te detienes. Del mismo modo, la rapidez de la luz en el vidrio es menor que en el aire por las demoras que causan las interacciones de la luz con los átomos a lo largo de su trayectoria.

3. Cuando caminas por la sala, eres tú quien comienza y concluye el recorrido. Esto no se parece a la luz que viaja a través del vidrio porque, de acuerdo con el modelo de la luz que pasa a través de un material transparente, la luz absorbida por el primer electrón que se hace vibrar no es la misma luz que se reemite, aun cuando las dos, como gemelas idénticas, sean indistinguibles.

26.5 Materiales opacos

Casi todas las cosas que te rodean son opacas: absorben luz sin reemitirla. Los libros, los escritorios, las sillas y las personas son opacos. Las vibraciones generadas por la luz a sus átomos y moléculas se convierten en energía cinética aleatoria: en energía interna.

Estos materiales se vuelven un poco más calientes.

Los metales son opacos. Debido a que los

F I G U R A 2 6 . 1 1

electrones exteriores de los átomos en los meta-

Los metales son brillantes porque sus

les no están unidos a un átomo particular, tie-

electrones libres vibran con facilidad

nen libertad de vagar con muy poca restricción

ante las oscilaciones de cualquier luz que

por el material (razón por la cual los metales

cae sobre ellos, y reflejan la mayor parte

conducen tan bien la electricidad y el calor).

de ella.

Cuando la luz incide sobre el metal y pone a

vibrar estos electrones libres, su energía no "sal-

ta" de átomo a átomo en el material, sino que se

refleja. Por eso los metales son brillantes.

La atmósfera de la Tierra es transparente a cierta luz ultravioleta, a toda la luz visible y a cierta luz infrarroja, pero es opaca a la luz ultravioleta de alta frecuencia. La pequeña cantidad de ultravioleta que pasa a través de ella es la responsable de las quemaduras solares. Si pasara toda, la humanidad se freiría hasta quedar carbonizada. Las nubes son La radiación ultravioleta de onda

larga, llamada UV-A, está cerca

semitransparentes al ultravioleta, así que puedes quemarte en un día nublado. La piel de la luz visible y no es la forma

oscura absorbe el ultravioleta antes de que pueda penetrar demasiado, en tanto que éste dañina de la UV. La ultravioleta

viaja más profundo en la piel clara. Con una exposición leve y gradual, la piel clara se con longitud de onda más corta,

broncea y aumenta su protección contra la luz ultravioleta. La luz ultravioleta también llamada UV-C, sería dañina si te

es perjudicial para los ojos y para los techos alquitranados. Ahora sabes por qué los alcanzara, pero es detenida casi

techos alquitranados están cubiertos con grava.

por completo por la capa de ozono

¿Has notado que las cosas parecen más oscuras cuando están húmedas que cuando de la atmósfera. La ultravioleta

intermedia, UV-B, es la que puede

están secas? La luz incidente sobre una superficie seca rebota de manera directa a tus causar daño ocular, quemaduras

ojos, en tanto que la luz incidente sobre una superficie húmeda rebota varias veces en el solares y cáncer de piel.

interior de la región húmeda transparente antes de llegar a tus ojos. ¿Qué ocurre con cada rebote? ¡Absorción! De modo que en una superficie húmeda ocurre más absorción de luz y la superficie parece más oscura.

PA R T E SEI S

LU Z

Sombras

A un delgado haz de luz a menudo se le llama rayo. Cuando estás de pie en la luz solar, parte de la luz se detiene y otros rayos continúan en una trayectoria en línea recta.

Proyectas una sombra, una región donde los rayos de luz no llegan. Si estás cerca de tu propia sombra, el contorno de tu sombra es nítido porque el Sol está alejado. Una fuente luminosa alejada y grande, o una fuente luminosa cercana y pequeña, producirán una sombra nítida. Una fuente luminosa cercana y grande produce una sombra un tanto borrosa (Figura 26.12). Por lo general, en el interior de una sombra hay una F I G U R A 2 6 . 1 2

Una fuente de luz pequeña produce una

sombra más definida que una fuente

más grande.

parte oscura y una parte más clara alrededor de sus bordes. Una sombra total se llama umbra y una sombra parcial se llama penumbra. La penumbra aparece donde parte de la luz es bloqueada, pero otra luz la llena (Figura 26.13). La penumbra también ocurre cuando la luz proveniente de una fuente ancha sólo es bloqueada en parte.

F I G U R A 2 6 . 1 3

Un objeto que se mantiene cerca de la

pared proyecta una sombra nítida por-

que la luz proveniente de direcciones un

Tanto la Tierra como la Luna proyectan sombras cuando la luz solar incide sobre poco diferentes no se extiende mucho

ellas. Cuando la trayectoria de cualquiera de estos cuerpos pasa por la sombra proyec-detrás del objeto. A medida que el objeto tada por el otro, ocurre un eclipse (Figura 26.14). Un ejemplo espectacular de la um-se aleja de la pared, la penumbra crece y

bra y la penumbra ocurre cuando la sombra de la Luna cae sobre la Tierra durante un la umbra se hace más pequeña. Cuando

eclipse solar. Debido al gran tamaño del Sol, los rayos se reducen de manera gradual el objeto está todavía más alejado, la

y proporcionan una umbra y una penumbra circundante (Figura 26.15). Si te paras sombra es menos definida. Cuando el

en la región de umbra de la sombra, experimentas oscuridad durante

el día: un eclipse objeto está muy alejado (no se muestra),

no se observa ninguna sombra porque la

total. Si te paras en la penumbra, experimentas un eclipse parcial y ves un creciente penumbra se expande y forma un gran

del Sol (recuerda las fotografías de los crecientes de eclipse parcial del Capítulo 1 y manchón.

recuerda la fotografía al inicio de este capítulo de un eclipse solar visto desde la estación espacial MIR). Durante un eclipse lunar, la Luna pasa por la sombra de la Tierra.

C A PÍ T U LO 26 PRO P I EDA D ES D E L A LU Z

495

F I G U R A 2 6 . 1 4

La Tierra ve una Luna llena

(a) Cuando la Tierra está entre el Sol y

la Luna, se ve una Luna llena.

(b) Cuando este alineamiento es perfec-

to, la Luna está en la sombra de la Tierra

(a)

y se produce un eclipse lunar.

(c) Una Luna nueva ocurre cuando la

Eclipse lunar: la Luna está completamente

Luna está entre el Sol y la Tierra.

en la sombra de la Tierra

(d) Cuando este alineamiento es per-

fecto, la sombra de la Luna cae sobre

parte de la Tierra y se produce un eclipse

(b)

solar.

La Luna nueva está fuera

de la vista de los observadores

en el lado nocturno de la Tierra

Luna nueva

(c)

Los observadores en la sombra

de la Luna presencian un eclipse solar

(d)

F I G U R A 2 6 . 1 5

Detalles de un eclipse solar. Los obser-

vadores en la umbra ven un eclipse total,

y los observadores en la penumbra ven

un eclipse parcial. La mayoría de los

observadores en la Tierra no ven ningún

eclipse.

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Qué tipo de eclipse (solar, lunar o ambos) es peligroso ver sin los ojos protegidos?

Las personas son advertidas de no

2. ¿Por qué los eclipses lunares son más frecuentes que los eclipses solares?

ver el Sol durante un eclipse solar

porque el brillo y la luz ultravioleta

de la luz solar directa dañan los

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

ojos. Este buen consejo con fre-

1. Sólo un eclipse solar es dañino, porque uno ve al Sol de manera directa. Durante cuencia es mal entendido por aque-un eclipse lunar, uno ve una Luna muy oscura. No es del todo oscura porque la llos que piensan que la luz solar es

atmósfera de la Tierra actúa como un lente y dobla parte de la luz hacia la región más dañina en este momen-de sombra. Es interesante que ésta sea la luz de los atardeceres y amaneceres to especial. Pero mirar al Sol

rojizos en todo el mundo, por lo que la Luna se ve de un rojo profundo y borroso cuando está en lo alto del cielo es

durante un eclipse lunar.

dañino con eclipse o sin él. De he-

cho, ¡mirar al Sol sin protección es

2. Puesto que la sombra de la Luna, pequeña en relación con el tamaño de la Tierra, más dañino que cuando parte de la

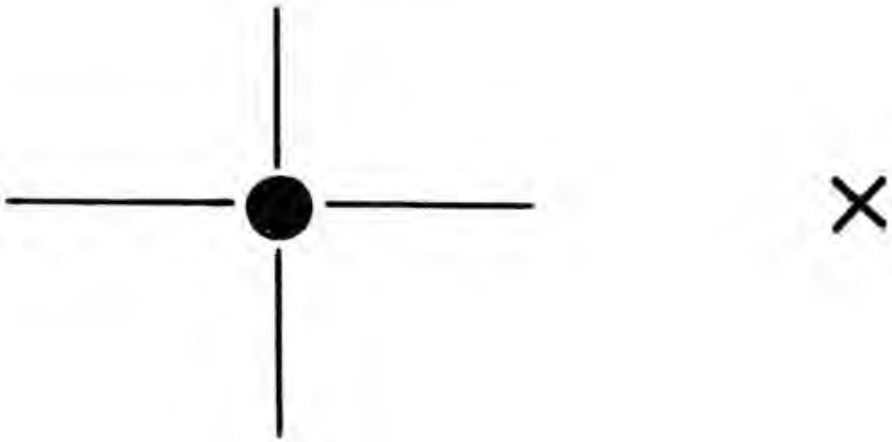
cubre una parte muy reducida de la superficie de la Tierra, sólo relativamente Luna lo bloquea! La razón de esta

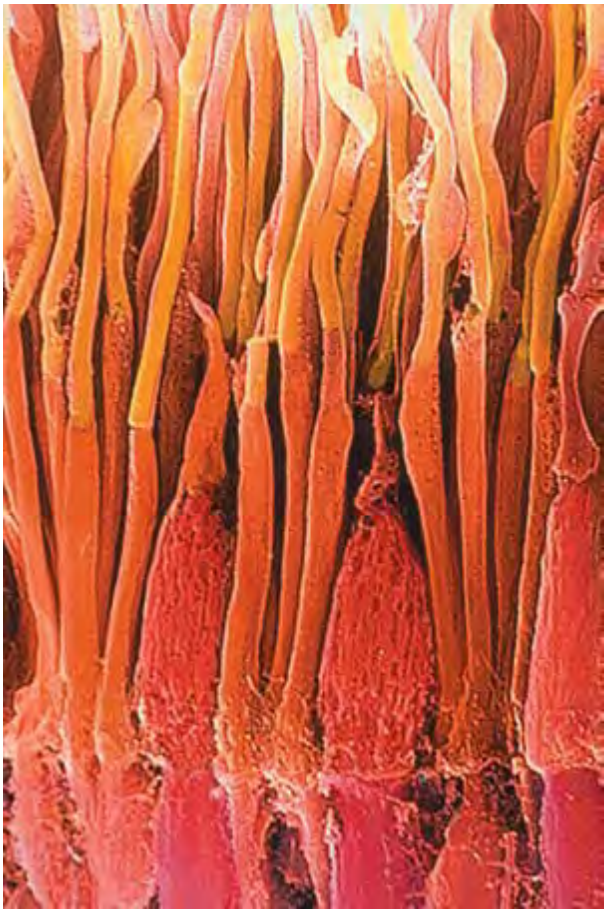
pocas personas están en la sombra de la Luna durante un eclipse solar. Pero la advertencia especial en el momen-sombra de la Tierra que cubre la Luna durante un eclipse lunar está a la vista de to de un eclipse es tan sólo que

todos quienes pueden ver la Luna en el cielo nocturno.

más personas están interesadas

en mirar al Sol durante este evento.





496

PA R T E SEI S

LU Z

26.6 Viendo la luz: el ojo

Córnea

La luz es lo único que uno ve con el instrumento óptico más sorprendente que se conoce: el ojo (Figura 26.16). A medida que la luz entra en el ojo, atraviesa la cubierta Retina

transparente llamada córnea, que realiza cerca de 70% del doblado necesario de la Cristalino

luz antes de que pase por una abertura en el iris (parte de color del ojo). La abertura Fóvea

se llama pupila. Luego la luz llega al cristalino, que afina el enfoque de la luz que pasa a través de un fluido gelatinoso denominado humor vítreo. Después la luz pasa Punto ciego

Iris

a la retina.

La retina cubre los dos tercios posteriores del ojo y es responsable del amplio F I G U R A 2 6 . 1 6

campo de visión que experimentas. Para ver con claridad, la luz debe enfocarse de El ojo humano.

manera directa sobre la retina. Cuando la luz se enfoca enfrente o detrás de la retina, la visión es borrosa. Hasta hace poco, la retina era más sensible a la luz que cualquier detector artificial jamás inventado. La retina no es uniforme. En medio de ella está la mácula, y una pequeña depresión en el centro es la fóvea, la región de visión más distintiva. Detrás de la retina está el nervio óptico, que transmite señales desde las celdas fotorreceptoras hasta el cerebro.

En la fóvea puede verse con mucho más detalle que en las

partes laterales del ojo. También hay un punto en la retina

donde los nervios que portan toda la información salen del

nervio óptico; es el punto ciego. Puedes demostrar que tienes un punto ciego en cada ojo si sostienes este libro a la distancia de tu brazo, cierras el ojo izquierdo y observas la

Figura 26.17 sólo con el ojo derecho. A esta distancia pue-

des ver tanto el punto redondo como la X. Si ahora acer-

cas el libro en forma lenta a tu cara, con el ojo derecho

fijo sobre el punto, llegarás a una posición de más o menos

F I G U R A 2 6 . 1 7

20-25 cm de tu ojo donde la X desaparece. Ahora repite

El experimento del punto ciego. Cierra el ojo izquierdo y observa

este ejercicio sólo con el ojo izquierdo abierto, esta vez mi-

con el ojo derecho el punto redondo. Ajusta tu distancia y encuen-

tra el punto ciego que borra la X. Hazlo con el otro ojo y observa

rando la X, y el punto desaparecerá. Cuando miras con am-

la X y el punto desaparece. ¿Tu cerebro llena las líneas cruzadas en

bos ojos abiertos, no estás al tanto del punto ciego, princi-

donde estaba el punto?

palmente porque un ojo "llena" la parte a la que el otro

ojo es ciego. Es sorprendente que el cerebro llene lo que se "espera" ver, incluso con un ojo abierto. Repite el ejercicio de la Figura 26.17 con objetos pequeños sobre distintos fondos. Observa que, en lugar de no ver nada, tu cerebro graciosamen -

te llena el fondo adecuado. De modo que no sólo ves lo que está ahí, ¡también ves lo que no está ahí!

La retina está compuesta de pequeñas antenas que resuenan ante la luz entrante.

Hay dos tipos básicos de antenas, los bastones y los conos (Figura 26.18). Como sus nombres lo indican, algunas de las antenas tienen forma de bastón, y otras, forma de cono. Los bastones predominan hacia la periferia de la retina, en tanto que los conos son más densos hacia la fóvea. Los bastones manejan la visión en luz baja, y los conos manejan la visión de color y el detalle. Hay tres tipos de conos: los que son estimulados por luz de frecuencia baja, los que son estimulados por luz de frecuencias intermedias y los que son estimulados por luz de frecuencias más altas. Los conos son muy densos justo en donde está la fóvea, y, dado que están empacados muy juntos, ahí son mucho más finos o estrechos que en ninguna otra parte de la retina.

El color se ve con más agudeza si la imagen se enfoca sobre la fóvea, donde no hay bastones. Los primates y una especie de ardilla terrestre son los únicos mamíferos que tienen los tres tipos de conos y experimentan visión a color completa. Las retinas de otros mamíferos consisten en su mayor parte de bastones, que son sensibles sólo al F I G U R A 2 6 . 1 8

brillo o la oscuridad, como una fotografía o película en blanco y

negro.

Vista amplificada de los bastones y los

En el ojo humano, el número de conos disminuye a medida que te alejas de la fóvea.

conos del ojo humano.

Es interesante que el color de un objeto desaparezca si se ve en la periferia del campo

C A PÍ T U LO 26 PRO P I EDA D ES D E L A LU Z

497

visual. Para demostrar esto, puedes pedirle a una amiga que entre a tu visión periférica con algunos objetos de colores brillantes. Descubrirás que puedes ver los objetos antes de poder ver de qué color son.

Otra observación interesante es que la periferia de la retina es muy sensible al mo-Algunos de los animales que tienen

visión de 360° sin girar la cabeza

vimiento. Aunque la visión es mala en el rabillo del ojo, es sensible a cualquier movi-son los conejos y las liebres debido

miento ahí. Los seres humanos están "programados" para buscar algo que se contonea a sus grandes ojos protuberantes

al lado de su campo visual, una característica que debió de ser importante en su desa-colocados a los lados de la cabeza.

rrollo evolutivo. Pide a tu amiga que agite estos objetos de colores brillantes cuando los Pero sólo tienen percepción de pro-lleve a la periferia de tu visión. Si apenas puedes ver los objetos cuando los agita, pero fundidad donde la visión de cada

no los ves en absoluto cuando están inmóviles, entonces no podrás decir de qué color ojo se traslapa un poco enfrente de

son (Figura 26.19). ¡Inténtalo y observa!

sus cabezas y detrás de ellos.

Otra característica distintiva de los bastones y los conos es la intensidad de la luz a la cual reaccionan. Los conos necesitan más energía que los bastones antes de "disparar"

un impulso por el sistema nervioso. Si la intensidad de la luz es muy baja, las cosas que ves no tienen color. Las intensidades bajas se ven con los bastones. La visión adaptada a la oscuridad se debe casi por completo a los bastones, en tanto que la visión en la luz brillante se debe a los conos. Las estrellas, por ejemplo, te parecen blancas. Sin embargo, casi todas las estrellas son en realidad de colores brillantes. Una exposición temporal de las estrellas con una cámara revela rojos y anaranjados rojizos para las estrellas "más frías" y azules y violetas azulados para las estrellas "más calientes". Sin embargo, la luz de las estrellas es muy débil para disparar los conos que perciben el color en la retina. Así que las estrellas las ves con los bastones y las percibes blancas o, cuando mucho, sólo con colores débiles. No obstante, las mujeres tienen umbrales un F I G U R A 2 6 .1 9

poco más bajos de disparo para los conos y pueden ver un poco más de color que los En la periferia de tu visión, puedes ver hombres. Así pues, si ella dice que ve estrellas de colores y él dice que no es cierto, ¡es un objeto sólo si se mueve; no puedes probable que ella tenga la razón!

ver su color en lo absoluto.

Se descubre que los bastones "ven" mejor que los conos hacia el extremo azul del espectro de color, y lo opuesto sucede en el otro extremo del espectro. En lo que respecta a los bastones, un objeto rojo profundo puede parecer negro. Por ende, si tienes dos objetos de color (por decir, uno azul y uno rojo), el azul parecerá mucho más brillante que Los ojos difieren en las diferentes

el rojo en luz difusa, aunque el rojo pueda ser mucho más brillante que el azul en luz criaturas. En la retina de un pollo

brillante. El efecto es muy intrigante. Prueba esto: en una habitación oscura, encuentra hay principalmente conos y sólo

algunos bastones, por lo que no

una revista o algo que tenga colores y, antes de asegurarte qué colores son, determina las ven bien la luz difusa. Las abejas

áreas más claras y las más oscuras. Luego lleva la revista a la luz.

Debes ver un cambio tienen conos que son sensibles a la

notable entre los colores más brillantes y más apagados.6

luz ultravioleta. El calamar gigante

Los bastones y los conos de la retina no están conectados de manera directa al ner-tiene los ojos más grandes del

vio óptico sino, muy sorprendentemente, están conectados a muchas otras células que mundo.

están unidas unas con otras. Si bien muchas de estas células están interconectadas, sólo algunas llevan información al nervio óptico. Por medio de estas interconexio-nes, una determinada cantidad de información se combina desde varios receptores visuales y "se digiere" en la retina. De esta forma, la señal luminosa "es pensada" antes de ir al nervio óptico y de ahí al cuerpo principal del cerebro. De modo que hay un cierto funcionamiento cerebral en el ojo. El ojo realiza parte del "razonamiento" por ti. Este Te ama…

razonamiento es traicionado por el iris, la parte colorida del ojo que se expande y se contrae y regula el tamaño de la pupila para admitir más o menos luz conforme cambia la intensidad de la luz. Sucede que la expansión o contracción del iris se relaciona con las emociones. Si ves, hueles, saboreas o escuchas algo que te agrada, tus pupilas aumentan de tamaño en forma automática. Si ves, hueles, saboreas o escuchas algo repugnante para ti, tus pupilas se contraen en forma automática. ¡Muchos jugadores de cartas deve-

¿No te ama?

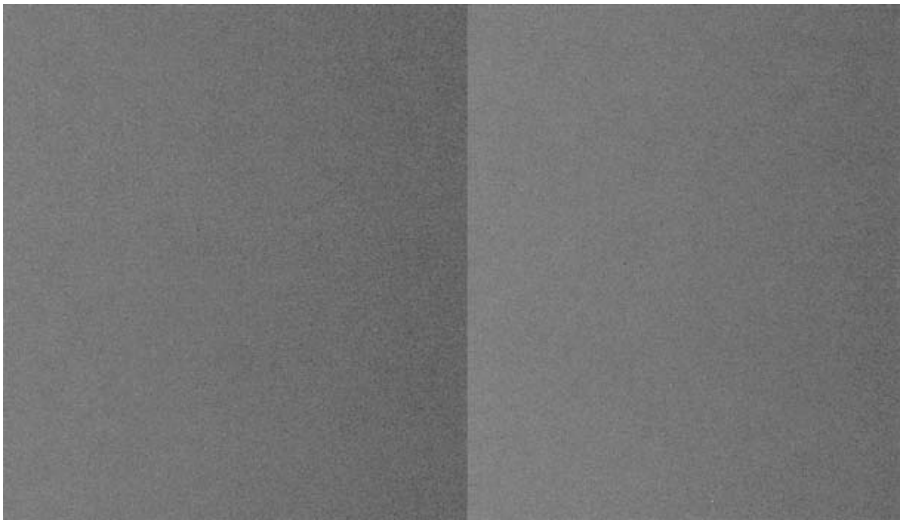
laron el valor de una mano por el tamaño de sus pupilas! (El estudio del tamaño de la F I G U R A 2 6 . 2 0

pupila como función de las actitudes se llama pupilometría.)

El tamaño de tus pupilas depende de tu

La luz más brillante que el ojo humano puede percibir sin daño es unas 500 mi- estado de ánimo.

llones de veces más brillante que la luz más tenue que puede percibir. Observa una 6Este fenómeno se llama efecto Purkinje, en honor del fisiólogo checo que lo descubrió.



bombilla cercana. Luego voltea para ver una luz más tenue más cercana. La diferencia en intensidad luminosa puede ser de más de un millón a uno. Debido a un efecto llamado inhibición lateral, no se perciben las diferencias reales en el brillo. Los lugares más brillantes en el campo visual no eclipsan las demás regiones porque cada vez que una célula receptora en la retina envía al cerebro una señal que corresponde a un brillo muy intenso, también envía señales a las células vecinas para atenuar sus respuestas.

De esta forma, se empareja el brillo de tu campo visual, lo que te permite discernir detalles en áreas muy brillantes, y también en áreas oscuras. (Las cámaras no son tan buenas para esto. La fotografía de una escena con fuertes diferencias de intensidad puede estar sobreexpuesta en un área y subexpuesta en otra.) La inhibición lateral exagera la diferencia del brillo en los bordes de los lugares del campo visual. Los bordes, por definición, separan una cosa de otra. De modo que se acentúan las diferencias. El rectángulo gris a la izquierda de la Figura 26.21 parece más oscuro que el rectángulo gris de la derecha cuando el borde que los separa lo tienes a la vista. Pero cubre el borde con tu lápiz o con tu dedo y se verán con el mismo brillo. Eso se debe a que ambos rectángulos tienen el mismo brillo; cada rectángulo está sombreado de más claro a más oscuro, si te mueves de izquierda a derecha. El ojo se concentra en la frontera

donde el borde oscuro del rectángulo izquierdo se une al borde claro del rectángulo derecho, y el sistema ojo-cerebro supone que el resto del rectángulo es igual. Se pone atención a la frontera y se ignora el resto.

Preguntas que deben considerarse: ¿la forma en la que el ojo selecciona los bordes y hace suposiciones sobre lo que se encuentra más allá es similar a la forma en la que algunas personas emiten juicios sobre otras culturas y otras personas? ¿No tiende uno, de la misma forma, a exagerar las diferencias superficiales al tiempo que ignora las semejanzas y sutiles diferencias internas?

F I G U R A 2 6 . 2 1

Ambos rectángulos tienen el mismo

brillo. Cubre la frontera entre ellos con

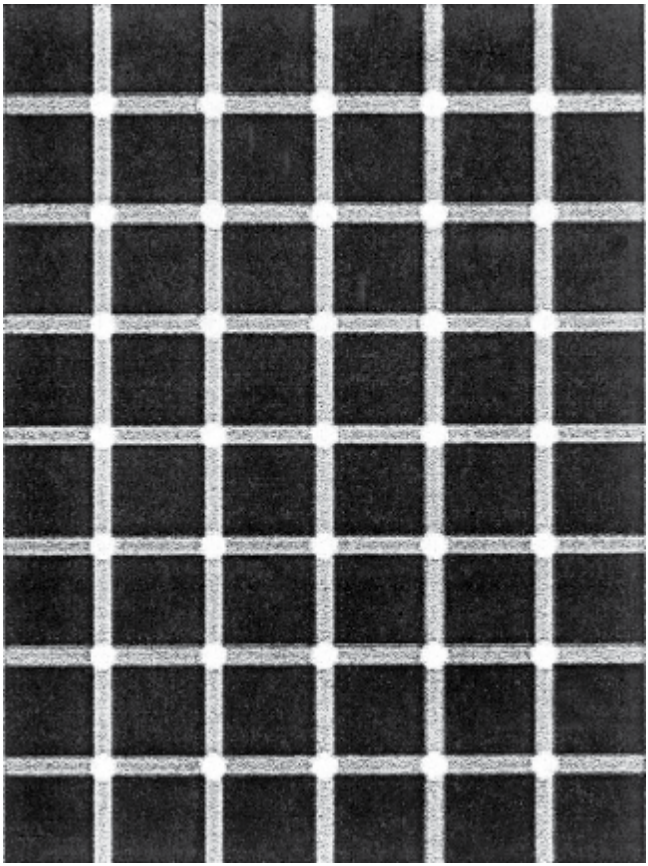
tu lápiz y observa.

F I G U R A 2 6 . 2 2

Brillo

Gráfica de niveles de brillo para el rec-

tángulo de la Figura 26.21.



C A PÍ T U LO 26 PRO P I EDA D ES D E L A LU Z

499

¿La línea inclinada realmente está entrecortada?

¿Las líneas de la derecha en realidad son más cortas?

¿Podrías encontrar

esto en la tienda?

¿Puedes contar los puntos negros?

PARÍS

EN LA

PRIMAVERA

¿La copa es más alta

¿Qué dice esta señal?

que el ancho del ala?

¿Las líneas verticales

son paralelas?

¿Las filas de ladrillos en realidad están chuecas?

F I G U R A 2 6 . 2 3

Ilusiones ópticas.

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)
Onda electromagnética. Onda portadora de energía emitida

Sombra. Región oscurecida que aparece donde los rayos de luz por una carga en vibración (con frecuencia electrones) que

son bloqueados por un objeto.

está compuesta de campos eléctrico y magnético oscilatorios

Umbra. Parte más oscura de una sombra donde toda la luz es

que se regeneran mutuamente.

bloqueada.

Espectro electromagnético. Intervalo de ondas electromagné-

Penumbra. Sombra parcial que aparece donde una parte, mas

ticas que se extiende en frecuencia desde las ondas de radio

no toda, de la luz es bloqueada.

hasta los rayos gamma.

Eclipse solar. Evento en el cual la Luna bloquea la luz provenien-

Transparente. Propiedad de los materiales para pasar luz en

te del Sol y la sombra de la Luna cae sobre parte de la Tierra.

líneas rectas sin dispersarla.

Eclipse lunar. Evento en el cual la Luna pasa por la sombra de
Opaco. Propiedad de los materiales que no permite el paso de la
Tierra.

luz (opuesto a transparente).

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N) 26.1 Ondas electromagnéticas

15. ¿En qué región del espectro electromagnético está la

1. ¿Qué induce un campo magnético variable?

frecuencia resonante de los electrones en el vidrio?

2. ¿Qué induce un campo eléctrico variable?

16. ¿Cuál es el destino de la energía de la luz ultravioleta que

3. ¿Qué produce una onda electromagnética?

incide sobre vidrio?

17. ¿Cuál es el destino de la energía de la luz visible que inci-

26.2 Velocidad de una onda electromagnética

de sobre vidrio?

4. ¿De qué manera el hecho de que una onda electromagné-

18. ¿Cuál es el destino de la energía de la luz infrarroja que

tica en el espacio nunca frene es congruente con la con-

incide sobre vidrio?

servación de la energía?

19. ¿Cómo se compara la frecuencia de la luz reemitida en

5. ¿De qué manera el hecho de que una onda electromag-

un material transparente, con la frecuencia de la luz que

nética en el espacio nunca acelere es congruente con la

estimula su reemisión?

conservación de la energía?

20. ¿Cómo se compara la rapidez promedio de la luz en

6. ¿Qué contienen y transportan los campos eléctrico y

vidrio, con su rapidez en el vacío?

magnético?

21. ¿Cuál es la diferencia entre la rapidez de la luz que sale de

un panel de vidrio y la rapidez de la luz incidente sobre el

26.3 El espectro electromagnético

vidrio?

7. ¿Cuál es la principal diferencia entre una onda de radio y

22. ¿Por qué las ondas infrarrojas con frecuencia se llaman

la luz? ¿Entre la luz y un rayo X?

ondas de calor?

8. ¿Más o menos cuánto del espectro electromagnético

medido ocupa la luz?

26.5 Materiales opacos

9. ¿Cuál es el color de la luz visible de las frecuencias más

23. ¿Por qué los materiales opacos se vuelven más calientes

bajas? ¿De las frecuencias más altas?

cuando la luz incide sobre ellos?

10. ¿Cuál es la diferencia entre la frecuencia de una onda de

24. ¿Por qué los metales son brillantes?

radio y la frecuencia de los electrones vibratorios que la

25. ¿Por qué los objetos húmedos suelen parecer más oscuros

producen?

que cuando están secos?

11. ¿Cómo se relaciona la longitud de onda de la luz con su

26. Distingue entre una umbra y una penumbra.

frecuencia?

27. ¿La Tierra y la Luna siempre proyectan sombras? Cuando

12. ¿Cuál es la longitud de onda de una onda que tiene una

uno pasa por la sombra del otro, ¿cómo se le llama?

frecuencia de 1 Hz y viaja a 300,000 km/s?

26.6 Viendo la luz: el ojo

13. ¿Qué se entiende cuando se dice que el espacio exterior

en realidad no está vacío?

28. ¿Cuál es la diferencia entre los bastones y los conos del ojo?

29. ¿Cuándo son más apreciables los objetos en la periferia de

26.4 Materiales transparentes

tu visión?

14. El sonido proveniente de un diapasón puede forzar a otro

30. Además de la cantidad de luz, ¿qué afecta al tamaño de la

diapasón a vibrar. ¿Cuál es el efecto semejante para la luz?

pupila del ojo?

C A PÍ T U LO 26 R E V ISI Ó N

P I E N S A Y R E A L I Z A (A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 31. Compara el tamaño de la Luna en el horizonte con su

cierra el ojo derecho. Si

tamaño cuando está más alta en el cielo. Una forma de

tu dedo parece saltar a

hacer esto es sostener a la distancia de tu brazo varios

la derecha, entonces usas

objetos que apenas bloqueen la Luna. Experimenta hasta

más el ojo derecho. Com-

que encuentres el objeto exacto, tal vez un lápiz grueso o

prueba con tus amigos

una pluma. Descubrirás que el objeto será menor de un

zurdos y diestros. ¿Existe

centímetro, según la longitud de tu brazo. ¿En realidad la

alguna relación entre el

Luna es más grande cuando está cerca del horizonte?

ojo dominante y la mano

32. ¿Cuál ojo usas más? Para demostrar cuál favoreces, sostén

dominante?

un dedo vertical a la distancia de tu brazo. Con ambos

ojos abiertos, observa detrás de él objetos distantes. Ahora

P I E N S A Y R E S U E L V E (A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 33. En 1676, el astrónomo Ole Roemer tuvo uno de esos

se muestra en el dibujo. Construye rayos de luz (similares a los

momentos "ajá" en la ciencia. Concluyó, a partir de múl-

de la Figura 26.15) y demuestra que el diámetro de la umbra

tiples observaciones sobre los eclipses de la luna de Júpiter

sobre la pared es el mismo que el diámetro de la bola y que el

en diferentes momentos del año, que la luz debe viajar

diámetro de la penumbra es tres veces el diámetro de la bola.

con rapidez finita y necesitaba 1,300 s para atravesar el

diámetro de la órbita de la Tierra alrededor del Sol.

Lámpara

Bola

Pared

Usando 300,000,000 km para el diámetro de la órbita

terrestre, calcula la rapidez de la luz con base en la esti-

mación de 1,300 s de Roemer. ¿Cómo difiere esto de un

valor moderno para la rapidez de la luz?

34. Más de 200 años después, Albert A. Michelson envió un

haz de luz desde un espejo giratorio hacia un espejo esta-

cionario a 15 km de distancia. Demuestra que el tiempo

transcurrido entre que la luz sale y regresa al espejo gira-

39. Una determinada instalación de radar rastrea aviones

torio fue de 0.0001 s.

mediante la transmisión de radiación electromagnética con

una longitud de onda de 3 cm. (a) Demuestra que la fre-

35. El Sol está a 1.50 3 1011 m de la Tierra. ¿Cuánto tarda

cuencia de esta radiación es 10 GHz. (b) Demuestra que el
la luz del Sol en llegar a la Tierra? ¿Cuánto tarda la luz
tiempo necesario para que un pulso de ondas de radar llegue
en cruzar el diámetro de la órbita de la Tierra? Compara
a un avión a 5 km de distancia y regrese es 3.3 3 1025 s.
este tiempo con el tiempo medido por Roemer en el siglo
XVII (abordado en el problema 33).
40. La longitud de onda de la luz cambia a medida que la
luz pasa de un medio a otro, en tanto que la frecuencia
36. Demuestra que un pulso de luz láser tardaría 2.5 s en
permanece igual. ¿La longitud de onda es más larga o
llegar a la Luna y rebotar de vuelta a la Tierra.
más corta en agua que en aire? Explica en términos de
37. La estrella más cercana, además del Sol, es Alpha Cen-
la ecuación rapidez 5 frecuencia 3 longitud de onda.
tauri, a 4.2 3 1016 m de distancia. Si hoy se recibiera un
Una determinada luz anaranjada tiene una longitud de
mensaje de radio proveniente de esta estrella, demuestra
onda de 600 nm (6 3 1027 m) en aire. ¿Cuál es su lon-
que se habría enviado hace 4.4 años.
gitud de onda en agua, donde la luz viaja a 75% de su
38. Una bola con el mismo diámetro que una bombil a se mantie-
rapidez en el aire? ¿En plexiglás, donde la luz viaja a 67%
ne a la mitad de camino entre la bombil a y una pared, como

de su rapidez en el aire?

P I E N S A Y E X P L I C A (S Í N T E S I S)

41. Un amigo dice, con un tono profundo, que la luz es la

46. ¿Cómo es posible tomar fotografías en completa

única cosa que puede ver. ¿Tu amigo está en lo correcto?

oscuridad?

42. Tu amigo continúa y ahora dice que la luz es producida

47. ¿Exactamente qué es lo que oscila en una onda de luz?

por la conexión entre electricidad y magnetismo. ¿Tu

48. ¿Cuál es la principal diferencia entre un rayo gamma y

amigo está en lo correcto?

un rayo infrarrojo?

43. ¿Cuál es la fuente fundamental de la radiación

49. ¿Cuál es la rapidez de los rayos X en el vacío?

electromagnética?

50. ¿Cuál viaja más rápido a través del vacío: un rayo infra-

44. ¿Cuál tiene longitudes de onda más largas: las ondas de

rrojo o un rayo gamma?

luz, los rayos X o las ondas de radio?

51. Tu amigo dice que las microondas y la luz ultravioleta tienen

45. ¿Cuál tiene las longitudes de onda más cortas: el ultravio-

diferentes longitudes de onda, pero viajan a través del espacio

leta o el infrarrojo? ¿Cuál tiene las frecuencias más altas?

con la misma rapidez. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo?

PA R T E SEI S

LU Z

52. Tu amigo dice que cualquier onda de radio viaja mucho
gafas esperarías que se pusiera más caliente? Defiende tu
más rápido que cualquier onda sonora. ¿Estás de acuerdo
respuesta.
o en desacuerdo, y por qué?
66. ¿Por qué un avión que vuela alto proyecta poca o ninguna
53. Tu amigo dice que el espacio exterior, en vez de estar
sombra sobre el suelo bajo él en tanto que los aviones que
vacío, está a reventar de ondas electromagnéticas. ¿Estás
vuelan bajo proyectan una sombra nítida?
de acuerdo o en desacuerdo?
67. La luz proveniente de una posición sobre la cual concen-
54. ¿Las longitudes de onda de las señales de radio y televi-
tras tu atención cae sobre tu fóvea, que contiene sólo
sión son más largas o más cortas que las ondas detectables
conos. Si quieres observar una fuente de luz débil, como
por el ojo humano?
una estrella tenue, ¿por qué no debes mirar directamente a
55. Supón que una onda luminosa y una onda sonora tienen la
la fuente?
misma frecuencia. ¿Cuál tiene la longitud de onda más
68. ¿Por qué los objetos iluminados por la luz de la Luna

larga?

carecen de color?

56. ¿Cuál necesita un medio físico para viajar: la luz, el soni-

69. ¿Por qué no ves color en la periferia de tu visión?

do o ambos? Explica.

70. ¿Por qué debes ser escéptico cuando tu pareja te toma de las

57. ¿Las ondas de radio viajan con la rapidez del sonido, con

manos, te mira con las pupilas contraídas y te dice "te amo"?

la rapidez de la luz o con alguna rapidez intermedia?

71. A partir de tu experimentación con la Figura 26.17, ¿tu

58. ¿Cuáles son las semejanzas y diferencias entre las ondas

punto ciego se ubica hacia tu nariz desde tu fóvea o hacia

de radio y la luz?

afuera de ella?

59. Un láser helio-neón emite luz con longitud de onda de

72. ¿Puedes inferir que una persona con pupilas grandes

633 nanómetros (nm). La luz proveniente de un láser de

por lo general es más feliz que una persona con pupilas

argón tiene una longitud de onda de 515 nm. ¿Cuál láser

pequeñas? Si no es así, ¿por qué no?

emite la luz con frecuencia más alta?

73. El planeta Júpiter está más de cinco veces más lejos del

60. ¿Por qué esperarías que la rapidez de la luz sea un poco

Sol que el planeta Tierra. ¿Cómo parece el brillo del Sol a

menor en la atmósfera que en el vacío?

esta mayor distancia?

61. ¿El vidrio es transparente u opaco a la luz con frecuencias

74. Cuando observas el cielo nocturno, algunas estrellas son

que coinciden con sus frecuencias naturales? Explica.

más brillantes que otras. ¿Es correcto decir que las estre-

62. Longitudes de onda corta de luz visible interactúan más

llas más brillantes emiten más luz? Defiende tu respuesta.

a menudo con los átomos en el vidrio que las longitudes

75. Cuando observas una galaxia distante con un telescopio,

de onda más largas. ¿Este tiempo de interacción tiende

¿cómo es que estás viendo hacia atrás en el tiempo?

a acelerar o frenar la rapidez promedio de la luz con

76. Cuando observas el Sol, lo ves como era hace 8 minutos.

longitud de onda corta en el vidrio?

Por tanto, sólo puedes ver el Sol "en el pasado". Cuando

63. ¿Qué determina si un material es transparente u opaco?

miras la parte trasera de tu propia mano, ¿la ves "ahora" o

64. Puedes sufrir una quemadura solar en un día nublado,

"en el pasado"?

pero puedes no quemarte incluso en un día soleado si

77. La "visión 20/20" es una medida arbitraria de la visión,

estás detrás de un vidrio. Explica.

que significa que puedes leer lo que una persona prome-

65. Supón que la luz solar cae sobre un par de gafas de lec-
dio puede leer a una distancia de 20 pies a la luz del día.
tura y sobre un par de gafas para el Sol. ¿Cuál par de
¿Cuánto es esta distancia en metros?

P I E N S A Y D I S C U T E (E V A L U A C I Ó N)

78. Uno escucha a la gente hablar de la "luz ultravioleta" y la
82. Si disparas una bala a través de una tabla, ésta frenará
"luz infrarroja". ¿Por qué estos términos son engañosos?
adentro y saldrá con una rapidez menor a la rapidez con
¿Por qué es menos probable que la gente hable de la "luz
la que entró. Entonces, ¿igualmente la luz frena cuando
de radio" y de la "luz de rayos X"?
pasa a través de un vidrio y también sale con una rapidez
79. Al saber que el espacio interplanetario consiste en un
más baja? Defiende tu respuesta.
vacío, ¿cuál es tu evidencia de que las ondas electromag-
83. Imagina que una persona puede caminar sólo con cierto
néticas pueden viajar a través del vacío?
paso, ni más rápido ni más lento. Si cronometras su andar
80. ¿Puedes ver las ondas de radio? ¿Puedes escuchar las
ininterrumpido por una habitación de longitud conocida,
ondas de radio? Discute esto con las personas que todavía
puedes calcular su rapidez de marcha. Sin embargo, si la
confunden las ondas sonoras con las ondas de radio.

persona se detiene en forma momentánea en su camino

81. Cuando los astrónomos observan una explosión de una

para saludar a otras en la habitación, el tiempo adicional

supernova en una galaxia distante, ven un súbito aumen-

que emplea en sus breves interacciones le confiere una

to simultáneo de la luz visible y de otras formas de radia-

rapidez promedio cuando camina por la habitación que es

ción electromagnética. ¿Esto es evidencia que sustenta

menor que su rapidez de marcha. ¿Esto en qué es similar a

la idea de que la rapidez de la luz es independiente de la

la luz que pasa a través de un vidrio? ¿En qué forma difiere?

frecuencia? Explica.

C A PÍ T U LO 26 R E V ISI Ó N

503

84. Sólo algunas de las personas en el lado diurno de la Tie-

89. Paul Doherty, también en las fotografías al inicio del

rra pueden presenciar un eclipse solar cuando ocurre,

capítulo, muestra imágenes de un eclipse anular. Observa

en tanto que todas las personas en el lado nocturno de

que las imágenes son contornos circulares completos.

la Tierra pueden presenciar un eclipse lunar cuando este

En este momento especial, ¿la distancia promedio de la

ocurre. ¿Por qué esto es así?

Luna a la Tierra está más cerca, más lejos o a su distancia

85. ¿Los planetas proyectan sombras? ¿Cuál es tu evidencia?

habitual?

86. Los eclipses lunares siempre son eclipses de una Luna

90. En 2004, el planeta Venus pasó entre la Tierra y el Sol.

llena. Esto es: la Luna siempre se ve llena justo antes y

¿Qué tipo de eclipse, si lo hubo, ocurrió?

después de que la sombra de la Tierra pasa sobre ella. ¿Por

91. ¿Qué evento astronómico verían observadores en la Luna

qué? ¿Por qué no puedes tener un eclipse lunar cuando la

en el momento en que la Tierra experimentara un eclipse

Luna está en sus fases creciente o de media Luna?

lunar? ¿En el momento en que la Tierra experimentara un

87. En las fotografías al inicio del capítulo, Dean Baird está

eclipse solar?

cubierto primero con imágenes circulares del Sol, luego

92. La intensidad de la luz disminuye como el inverso al cua-

con imágenes con forma de creciente. ¿Dónde en el cielo

drado de la distancia respecto de la fuente. ¿Esto significa

está la Luna en relación con el Sol cuando las imágenes

que se pierde energía luminosa? Explica.

son crecientes?

93. La luz proveniente del flash de una cámara disminuye

88. Los diámetros de los círculos que constituyen las

con la distancia, en concordancia con la ley del inverso al

imágenes solares en la fotografía de Dean son cerca de

cuadrado. Comenta acerca de un pasajero de avión que

1/100 la distancia respecto de las aberturas en las hojas

toma una fotografía con flash de una ciudad en la noche

que proyectan las manchas. Esto significa que 100

desde un avión que vuela alto.

círculos colocados extremo con extremo se extenderían

94. Los barcos determinan la profundidad del océano al

desde cada mancha hasta la abertura que proyecta la

rebotar ondas de sonar desde el fondo marino y medir

mancha. ¿Cómo te dice esto cuántos soles cabrían entre

el tiempo de viaje redondo. ¿Cómo es que los aviones

el árbol y la distancia de 150,000,000 de kilómetros

determinan de igual forma su distancia hasta el suelo

entre el Sol y la Tierra?

bajo ellos?

C A P Í T U L O 2 7

Color 2

FPO

27.1 Color en el mundo

3

27.2 Reflexión selectiva

27.3 Transmisión selectiva

27.4 Mezcla de luces de colores

27.5 Mezcla de pigmentos de colores

27.6 Por qué el cielo es azul

4

27.7 Por qué los atardeceres son rojos

27.8 Por qué las nubes son blancas

27.9 Por qué el agua es azul verdoso

5

1 Carlos Vásquez despliega una variedad de colores cuando es iluminado sólo con lámparas roja, verde y azul. 2 El color azul del cielo se debe a la dispersión de la luz solar en el aire; el color cian del agua del océano tropical se debe a la absorción de las

porciones infrarroja y roja de la luz solar en el agua. 3 Una fotografía de la escritora científica Suzanne Lyons con sus hijos Tris-

tán y Simone. 4 Un negativo de la misma fotografía muestra sus colores complementarios. 5 El colorista y profesor de física Jeff Wetherhold (Parkland High School en Allentown, PA) tiene dos

pasiones: pintar y enseñar física.

C A PÍ T U LO 26 P

C RO

A PPÍ I E

T DA

U L D E

O 2 S D

7

E L

A L

CO L U

O ZR

505

Isaac Newton no se hizo famoso primero por sus leyes en el haz de luz y observó que la luz blanca se separaba en del movimiento, ni siquiera por su ley de gravitación los colores del arcoíris.

universal. La fama de Newton comenzó con su estudio

Newton demostró que dentro de un haz de luz solar

de la luz. Aproximadamente en 1665, mientras estudiaba están todos los colores del arcoíris. La luz blanca es una las imágenes de los cuerpos composición de los colores del arcoíris. Además, demostró celestes formadas por una que un arcoíris es el resultado de una dispersión similar de lente, observó coloración en la luz solar por las gotas de agua del cielo.

los bordes de las imágenes.

Más importante, con un segundo prisma, Newton des-

Para examinar esto, oscure-

cubrió que estos colores podían recombinarse y volver a

ció su habitación y dejó que formar luz blanca, lo cual confirmaba que la luz blan-un haz de luz solar pasara ca era, de hecho, la combinación de todos los colores del por un pequeño orificio arcoíris. A la mitad de su vida fue electo para la Royal circu lar de la persiana que Society, donde mostró el primer telescopio reflector del produjo una mancha circular

mundo. Éste todavía puede admirarse en la biblioteca de

de luz blanca sobre la pared la Royal Society en Londres, donde se conserva con la opuesta. Luego colocó un inscripción: "El primer telescopio reflector, inventado por prisma triangular de vidrio sir Isaac Newton y fabricado con sus propias manos".

27.1 Color en el mundo

Las rosas son rojas y las violetas son azules; los colores intrigan a artistas y físicos por igual. Para el físico, los colores de los objetos no están en las sustancias de los objetos en sí o ni siquiera en la luz que emiten o reflejan. El color es una experiencia fisiológica y está en el ojo de quien lo observa. Así que, cuando se dice que la luz de una rosa es roja, en un sentido más estricto lo que se quiere decir es que parece roja. Muchos organismos, incluidas las personas con una visión del color defectuosa, no ven la rosa como roja en absoluto.

Los colores que uno ve dependen de la frecuencia de la luz que uno ve. Luces de diferentes frecuencias se perciben como colores diferentes; la mayoría de las personas percibe la luz con la frecuencia más baja que pueden detectar los seres humanos como

color rojo, y la frecuencia más alta, como violeta. Entre ellas se encuentra un número infinito de tonalidades que constituyen el espectro de color del arcoíris. Por convención, dichas tonalidades se agrupan en los siete colores: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo y violeta. Las luces de estos colores juntas se ven como blanca. La luz blanca del Sol es una combinación de todas las frecuencias visibles.

27.2 Reflexión selectiva

Excepto por fuentes de luz como las lámparas, los láseres y los tubos de descarga de gas (que se estudiarán en el Capítulo 30), la mayor parte de los objetos que te rodean refleja la luz, más que emitirla. Sólo reflejan una parte de la luz que incide sobre ellos, la parte que les da su color. Una rosa, por ejemplo, no emite luz; refleja la luz (Figura 27.1). Si se hace pasar la luz solar por un prisma y luego se coloca una rosa color rojo oscuro en varias partes del espectro, los pétalos parecen marrón o negro en todas las partes del espectro excepto en el rojo. En la parte roja del espectro, los pétalos se ven rojos, pero el tallo verde y las hojas se ven negras. Esto demuestra que los pétalos rojos tienen la capacidad de reflejar la luz roja, pero no la luz de otros colores. Del mismo modo, las hojas verdes tienen la capacidad de reflejar la luz verde, pero no la luz de otros colores.

Cuando la rosa se coloca en la luz blanca, los pétalos parecen rojos y las hojas parecen verdes porque los pétalos reflejan la parte roja de la luz blanca y las hojas reflejan la F I G U R A 27.1

parte verde. Para entender por qué los objetos reflejan colores de luz específicos, debes Los colores de las cosas dependen de los dirigir tu atención al átomo.

colores de la luz que los ilumina.

506

PA R T E SEI S

LU Z

Electrones

La manera en que la luz se refleja en los objetos es similar a la forma en la que el sonido se "refleja" en un diapasón cuando otro diapasón cercano lo pone a vibrar. Un diapasón puede hacer que otro vibre aun cuando las frecuencias no coincidan, si bien con amplitudes reducidas en forma significativa. Lo mismo sucede con los átomos y las moléculas. Los campos eléctricos oscilatorios de las ondas electromagnéticas pueden forzar Núcleo

la vibración de los electrones exteriores que zumban alrededor del núcleo atómico.1 Una atómico

vez en vibración, estos electrones envían sus propias ondas electromagnéticas, tal como los diapasones acústicos vibratorios envían ondas sonoras.

F I G U R A 2 7 . 2

Cada material tiene frecuencias naturales diferentes para absorber y emitir radia-Los electrones exteriores de un átomo

ción electromagnética. En un material, los electrones oscilan con facilidad a ciertas fre-vibran y resuenan tal como lo harían

cuencias; en otro material, oscilan con facilidad a frecuencias diferentes. A frecuencias pesas sobre resortes. Por consiguiente,

resonantes en las cuales las amplitudes de oscilación son grandes, la luz es absorbida, los átomos y las moléculas se compor-pero a frecuencias por debajo y por arriba de las frecuencias resonantes, la luz se reemitan, en cierto modo, como diapasones

ópticos.

te. Si el material es transparente, la luz reemitida pasa a través de él. Si el material es opaco, la luz reemitida regresa al medio del cual provino. Esto es reflexión.

Por lo general, un material absorbe luz de algunas frecuencias y refleja el resto. Si un material absorbe la mayor parte de la luz visible que incide sobre él, pero refleja el rojo, por ejemplo, entonces parece rojo. Es por ello que los pétalos de una rosa roja son rojos y el tallo es verde. Los átomos de los pétalos absorben toda la luz visible excepto la roja, la cual reflejan; los átomos del tallo absorben toda la luz excepto la verde, la cual reflejan.

Un objeto que refleja la luz de todas las frecuencias visibles, como lo hace la parte blanca de esta página, es del mismo color que la luz que alumbra sobre él. Si un material absorbe toda la luz que alumbra sobre él, no refleja nada y se ve negro.

F I G U R A 2 7 . 3

(a) Una bola roja vista bajo luz blanca.

El color rojo se debe a que la bola refleja

sólo la pare roja de la luz que lo ilumina.

El resto de la luz es absorbido por la

superficie. (b) Una bola roja vista bajo

luz roja. (c) Una bola roja vista bajo luz

verde. La bola parece negra porque la

superficie absorbe la luz verde: no hay

fuente de luz roja para que la refleje.

(a)

(b)

(c)

Es interesante que los pétalos de casi todas las flores amarillas, como los narcisos, reflejen el rojo y el verde, así como el amarillo. Los narcisos amarillos reflejan una amplia banda de frecuencias. Los colores reflejados de la mayoría de los objetos no son colores puros de una sola frecuencia, sino que están compuestos de una variedad de frecuencias.

Un objeto puede reflejar sólo aquellas frecuencias que están presentes en la luz que ilumina. Por lo tanto, el aspecto de un objeto coloreado depende del tipo de luz que lo ilumine. Una lámpara incandescente, por ejemplo, emite más luz en las frecuencias bajas que en las altas, lo que intensifica cualquier rojo que se vea en esta luz.

En una tela que sólo tenga una pequeña cantidad de rojo, el rojo es más evidente bajo una lámpara incandescente de lo que es bajo una lámpara fluorescente. Las lámparas fluorescentes son más ricas en las frecuencias más altas y, por tanto, los azules se inten-sifican bajo ellas. Por lo general, el color "verdadero" de un objeto corresponde al color F I G U R A 2 7 . 4

que tiene en la luz diurna. Cuando compres ropa o accesorios, el color que ves en la luz La mayor parte del pelaje del conejo

refleja luz de todas las frecuencias y

artificial puede ser muy diferente del color verdadero (Figura 27.5).

parece blanco a la luz solar. Su pelaje

oscuro absorbe toda la energía radiante

1

de la luz solar incidente y, por tanto,

Las palabras oscilación y vibración se refieren ambas al movimiento periódico: un movimiento que se repite de parece negro.

manera regular.

C A PÍ T U LO 27 CO LO R

507

F I G U R A 2 7 . 5

El color depende de la fuente de luz.

27.3 Transmisión selectiva

El color de un objeto transparente depende del color de la luz que trans-Rojo

mite. Un pedazo de vidrio de color contiene tintes o pigmentos: pequeñas Vidrio azul

Anaranjado

partículas que selectivamente absorben luz de ciertas frecuencias y transmi-Amarillo

ten otras de manera selectiva. Un pedazo de vidrio rojo se ve rojo porque Verde

absorbe todos los colores que constituyen la luz blanca, con excepción de Azul

la roja, que es la que transmite. De igual modo, un pedazo de vidrio azul Violeta

parece azul porque absorbe luz de los demás colores que lo iluminan y transmite principalmente luz azul. En términos atómicos, los electrones de los átomos F I G U R A 2 7. 6

Sólo se transmite la energía que tiene la

del pigmento absorben de manera selectiva la luz de ciertas frecuencias. La luz de otras frecuencia de la luz azul; la energía de frecuencias se reemite de molécula a molécula en el vidrio. La energía de la luz absor- las demás frecuencias o se absorbe para bida aumenta la energía cinética de las moléculas y el vidrio se calienta. Las ventanas calentar el objeto, o se refleja.

de vidrio ordinarias no tienen color porque transmiten la luz de todas las frecuencias visibles con la misma efectividad.

P U N T O D E C O N T R O L

1. Cuando es luz roja la que alumbra una rosa roja, ¿por qué las hojas se ponen más calientes que los pétalos?

2. Cuando es luz verde la que alumbra una rosa, ¿por qué los pétalos parecen negros?

3. Si sostienes cualquier fuente de luz blanca entre tú y un pedazo de vidrio rojo, verás dos reflejos del vidrio: uno desde la superficie frontal y uno desde la superficie trasera. ¿De qué color es cada reflejo?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. Las hojas absorben la energía de la luz roja, en lugar de reflejarla y, por tanto, se ponen más calientes.

2. Los pétalos absorben la luz verde, en lugar de reflejarla. Puesto que el verde es el único color que ilumina la rosa y dado que el verde no contiene rojo para reflejarse, la rosa no refleja color y parece negra.

3. La reflexión desde la superficie frontal es blanca porque la luz no entra lo suficiente en el vidrio de color para permitir la absorción de luz que no sea roja. Sólo la luz roja llega a la superficie trasera, porque los pigmentos del vidrio absorben todos los demás colores y,

por tanto, la reflexión trasera es roja.

27.4 Mezcla de luces de colores

Es interesante observar que el

Es muy fácil demostrar que la luz blanca proveniente del Sol es una composición de

“negro” que ves en las escenas más

todas las frecuencias visibles, como lo hizo Newton por primera vez hace casi cuatro oscuras en una pantalla de televisión es tan sólo el color de la panta-

siglos, cuando hizo pasar luz solar por un prisma para formar un espectro con los lla sin iluminar, que es más un color

colores del arcoíris y luego, utilizando un segundo prisma, recombinó dicho espectro gris claro que negro. Puesto que tus

en luz blanca. La intensidad de la luz proveniente del Sol varía con la frecuencia, y es ojos son sensibles al contraste con

más intensa en la parte amarillo-verde del espectro. Es interesante observar que los las partes iluminadas de la pantalla,

ojos humanos evolucionaron para tener una máxima sensibilidad en este intervalo.

ves este color gris como negro.

Es por ello que cada vez más camiones de bomberos en la actualidad se pintan de

508

PA R T E SEI S

LU Z

amarillo-verde, en particular en los aeropuertos, donde la visibilidad es vital. La sensibilidad a la luz amarillo-verde también explica por qué ves mejor de noche con la iluminación de las lámparas de vapor de sodio amarillas que con las lámparas que tienen filamento de tungsteno del mismo brillo.

Brillo

La distribución gráfica de brillo y frecuencia se denomina curva de radiación de luz Luz visible

solar (Figura 27.7). Casi todos los blancos producidos con luz solar reflejada compar-Frecuencia

ten esta distribución de frecuencia.

Todos los colores combinados forman blanco. Es interesante que la percepción del F I G U R A 2 7 . 7

La curva de radiación de la luz solar es

blanco también sea resultado de la combinación de sólo la luz roja, verde y azul. Para una gráfica de brillo y frecuencia. La

entender esto, se divide la curva de radiación solar en tres regiones, como en la Fi-luz solar es más brillante en la región

gura 27.8. Tres tipos de receptores con forma de cono en tus ojos perciben el color.

amarillo-verde, en medio del intervalo

La luz en el tercio inferior de la distribución espectral estimula los conos sensibles a visible.

frecuencias bajas y parece roja; la luz en el tercio de en medio estimula los conos sensibles a frecuencias medias y parece verde; la luz en el tercio superior estimula los conos sensibles a las frecuencias más altas y parece azul. Cuando los tres tipos de conos se estimulan de manera equitativa, se ve blanco.

Colores primarios

Brillo

Si proyectas luz roja, verde y azul con el mismo brillo sobre una pantalla, verás que, Rojo Verde Azul

donde todas se traslapan, se produce blanco. Donde dos de los tres colores se traslapan, Frecuencia

se produce otro color (Figura 27.9). En el lenguaje de los físicos, se dice que las luces de colores que se traslapan se suman unas con otras. Entonces, se dice que las luces roja, F I G U R A 2 7 . 8

verde y azul se suman para producir luz blanca, y que cualesquiera dos de estos colores Curva de radiación de la luz solar divide luz se suman para producir otro color. Diferentes cantidades de rojo, verde y azul, dida en tres regiones: roja, verde y azul

que son los colores a los cuales son sensibles cada uno de los tres tipos de conos, pro-

(RGB, por sus siglas en inglés). Éstos

son los colores primarios aditivos.

ducen cualquier color en el espectro. Por esta razón, el rojo, el verde y el azul se llaman colores primarios aditivos. Este sistema de color, conocido por las iniciales RGB, se usa en monitores de computadora y en aparatos de televisión. Puntos rojos, verdes y azules crean la imagen. El cian, el amarillo y el magenta aparecen donde se traslapan pares de puntos. Un examen cercano de la imagen en una pantalla de televisión reve-lará el ensamblaje de manchas diminutas, cada una de menos de un milímetro de diámetro. Cuando la pantalla se enciende, las mezclas de colores RGB vistos a distancia

SCREENCAST: Color

proporcionan un rango completo de colores, incluido el blanco.

F I G U R A 2 7 . 9

Adición de color por la mezcla de luces

de colores. Cuando tres proyectores

alumbran con luces roja, verde y azul

sobre una pantalla blanca, las partes

que se traslapan producen colores dife-

rentes. El blanco se produce donde los

tres colores se traslapan.

Si se suman combinaciones dife-

P U N T O D E C O N T R O L

rentes de colores puros del arcoíris

con intensidades diferentes y

Ya que la luz blanca es la suma de todos los colores, ¿el negro es simple-se contrastan con entornos más

mente la ausencia de luz?

brillantes o más tenues, se pueden

producir colores como rosa chillón,

marrón y cualquier otro de los

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

colores de la naturaleza.

Sí.

C A PÍ T U LO 27 CO LO R

509

Colores complementarios

He aquí lo que sucede cuando se combinan dos de los tres colores primarios aditivos con la misma intensidad:

Rojo azul magenta

VIDEO: El pico amarillo-verde

de la luz solar

Rojo verde amarillo

Azul verde cian

Se dice que el magenta es el opuesto del verde, el amarillo es el opuesto del azul y el cian es el opuesto del rojo. Ahora, cuando se suma cada uno de estos colores con su opuesto, se obtiene blanco:

Magenta verde blanco (rojo azul verde)

Amarillo azul blanco (rojo verde azul)

Cian rojo blanco (azul verde rojo)

Cuando dos colores se suman y producen blanco, se llaman colores complementarios. Cada tonalidad tiene algún color complementario que, cuando se suma con él, resulta en blanco.

El hecho de que un color y su complemento se combinen para producir luz blanca se aprovecha muy bien en la iluminación de las artes escénicas. Las luces azul y amarilla que alumbran a los

intérpretes, por ejemplo, producen el efecto de luz blanca, excepto donde uno de los dos colores está ausente, como en las sombras. La sombra de una lámpara —por decir, la azul— es iluminada por la lámpara amarilla y parece amarilla. De igual modo, la sombra proyectada por la lámpara amarilla se ve azul. Éste es un efecto muy interesante. Este efecto se observa en la Figura 27.10, donde las luces roja, verde y azul alumbran la pelota de golf. Observa las sombras proyectadas por la pelota. La F I G U R A 2 7.1 0

sombra del medio la proyecta el proyector verde y no es oscura porque está iluminada La pelota de golf blanca parece blanca cuando se ilumina con luces roja, verde

por las luces roja y azul, lo que forma magenta. La sombra proyectada por la luz azul y azul de iguales intensidades. ¿Por qué parece amarilla porque está iluminada por las luces roja y verde. ¿Puedes ver por qué la las sombras de la pelota son de color sombra proyectada por la luz roja parece cian?

cian, magenta y amarillo?

P U N T O D E C O N T R O L

1. A partir de la Figura 27.9, encuentra los complementos del cian, el amarillo y el rojo.

2. Rojo 1 azul 5

VIDEO: Sombras de colores

3. Blanco 2 rojo 5

4. Blanco 2 azul 5

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. Rojo, azul, cian

2. Magenta

3. Cian

4. Amarillo

27.5 Mezcla de pigmentos de colores

Todo artista sabe que si mezclas pintura roja, verde y azul, el

resultado no será blanco, sino un fangoso marrón oscuro. Por supuesto, las pinturas roja y verde no se combinan para formar amarillo, como es la regla para la mezcla de luces de colores. La mezcla de pigmentos en pinturas y tintes difiere por completo de la mezcla de luces. Los pigmentos son pequeñas partículas que absorben colores específicos. Por ejemplo, los pigmentos que producen el color rojo absorben el color complementario cian. De modo que algo

pintado de rojo absorbe principalmente cian, por lo que refleja el rojo. En efecto, el cian se resta de la luz blanca. Algo pintado de azul absorbe el amarillo y, por tanto, refleja todos los colores excepto el amarillo. Quita el amarillo del blanco y obtienes azul. El cian, el amarillo y el magenta son los colores primarios sustractivos. La variedad de colores en las fotografías a color de cualquier libro es el resultado de puntos color cian, amarillo y magenta. La luz ilumina el libro, y la luz de ciertas frecuencias se resta de la luz reflejada. Las reglas de la sustracción del color difieren de las reglas de la suma de luz.

La impresión a color es una aplicación interesante de la mezcla de colores. Se toman tres fotografías (separación de color) de la ilustración que se va a imprimir: una a través de un filtro magenta, una a través de un filtro amarillo y una a través de un filtro cian.

Cada uno de los tres negativos tiene un patrón diferente de áreas expuestas que corresponde al filtro utilizado y a la distribución de color de la ilustración original. La luz alumbra a través de estos negativos sobre placas metálicas que tienen un tratamiento (a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

F I G U R A 2 7 . 1 1

Sólo cuatro colores de tinta se utilizan para imprimir ilustraciones y fotografías a color: (a) magenta, (b) amarillo, (c) cian, negro. Cuando se combinan el magenta, el amarillo y el cian, producen (d). La adición de negro (e) produce el resultado final (f).

F I G U R A 2 7 . 1 2

Los tintes o pigmentos, como en las tres transparencias mostradas, absorben y restan de manera efectiva luz de algunas frecuencias y sólo transmiten parte del espectro. Los colores primarios sustractivos son cian, amarillo y magenta. Cuando la luz blanca atraviesa las hojas encimadas de estos colores, se bloquea (resta) la luz de todas las frecuencias y se tiene negro. Donde sólo se traslapan cian y amarillo, se resta luz de todas las frecuencias, excepto verde. Varias

proporciones de tintes cian, amarillo y magenta producirán casi cualquier color del espectro.

especial para contener tinta de impresión sólo en áreas que se han expuesto a la luz. Los depósitos de tinta son regulados sobre diferentes partes de la placa por puntos diminutos. Las impresoras de inyección de tinta depositan varias combinaciones de tintas cian, amarillo, magenta y negro. Esto es impresión CMYK (iniciales en inglés de cian, magenta y amarillo; K indica negro). Es interesante que los tres colores puedan producir negro, pero eso ocupa más tinta y deja un tono de color, de ahí la tinta negra, que funciona mejor. Examina con una lupa el color de cualquiera de las figuras de un libro y verás cómo los puntos de estos colores que se enciman muestran un amplio rango de colores. U observa de cerca un tablero de anuncios.

Se observa que todas las reglas de suma y resta de colores pueden deducirse de las Figuras 27.9, 27.10 y 27.12.

F I G U R A 2 7 . 1 3

Cuando observas los colores de una pompa de jabón o película jabonosa, ves cian, Los vivos colores de Sneezlee repre-amarillo y magenta de forma predominante. ¿Qué te dice esto? ¡Te dice que algunos sentan muchas frecuencias de luz. Sin colores primarios se sustrajeron de la luz blanca original! (En el Capítulo 29 se estu-embargo, la fotografía es una mezcla diará cómo ocurre esto.)

de sólo cian, amarillo, magenta y negro

(CYMK).

Lo que ves

Blanco

P U N T O D E C O N T R O L

Rojo

Para la proyección de luz, los colores primarios son RGB. Para la luz que se Verde

ve por reflexión de superficies opacas, los colores primarios son CMY.

Azul

¿Esto es correcto?

Amarillo

Cian

Magenta

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

4.3 5.0 6.0 7.5

¡Sí! Y para la luz reflejada, mezcla el negro con los colorantes para obtener imágenes primorosas.

Frecuencia, 1014 Hz

F I G U R A 2 7 . 1 4

Rangos aproximados de las frecuencias

que se perciben como los colores pri-

marios aditivos y los colores primarios

sustractivos.

27.6 Por qué el cielo es azul

No todos los colores son resultado de la suma o resta de luz. Algunos colores, como el azul del cielo, son resultado de la dispersión. Para entender la dispersión, piensa en un Radiación dispersada

haz de sonido de una frecuencia particular dirigido a un diapasón. El diapasón se pone Haz incidente a vibrar y redirige el haz en múltiples direcciones. El diapasón dispersa el sonido. Si la frecuencia de la onda sonora incidente está cerca de la frecuencia de vibración natural del diapasón, la dispersión es intensa. Si la frecuencia del haz está lejos de la frecuencia Átomo

natural del diapasón, la dispersión es débil.

Un proceso similar se observa con la dispersión de la luz por parte de átomos y moléculas en la atmósfera.2 Estas partículas emiten luz con más intensidad en la región F I G U R A 2 7.1 5

ultravioleta, por lo que se puede decir que tienen frecuencias naturales que son más Un haz de luz cae sobre un átomo y aumenta el movimiento vibratorio de los

altas que las frecuencias de la luz visible. Esto significa que la frecuencia de la luz azul electrones en el átomo. Los electrones se parecerá más que la luz roja a las frecuencias naturales de los átomos y las moléculas vibratorios reemiten la luz en varias y se dispersará con más intensidad que la luz roja. Puedes pensar que una molécula en direcciones. La luz se dispersa.

el aire es como una pequeña campana que "tañe" a una frecuencia alta, como la de la Figura 27.2, pero puede activarse para vibrar débilmente a una frecuencia más baja.

Las moléculas de nitrógeno y oxígeno que constituyen la mayor parte de la atmósfera son como pequeñas campanas que "tañen" con frecuencias altas cuando las energiza la luz solar. Al igual que el sonido de las campanas o de los diapasones, la luz reemitida SCREENCAST: Por qué el cielo

se envía en todas direcciones.

es azul

2Este tipo de dispersión, llamada dispersión Rayleigh, ocurre siempre que las partículas dispersadas son mucho más pequeñas que la longitud de onda de la luz incidente y tienen resonancias a frecuencias más altas que las de la luz dispersada. La dispersión es más compleja de lo que se expone en este texto.

512

PA R T E SEI S

LU Z

De las frecuencias visibles de la luz solar, el violeta se dispersa más en la atmósfera, seguido en orden por el azul, el verde, el amarillo, el anaranjado y el rojo. El rojo se dispersa sólo una décima parte de lo que se dispersa el violeta. Aunque la luz violeta se dispersa más que la azul, tus ojos no son muy sensibles a la luz violeta. Por tanto, la luz azul dispersada es lo que predomina en tu visión, y el cielo se ve azul.

El azul del cielo varía en lugares diferentes bajo condiciones dis-

tintas. Un factor principal es el contenido de vapor de agua de la

atmósfera. En días claros y secos, el cielo es de un azul más oscuro

que en los días claros con humedad alta. En lugares donde el aire su-

perior es excepcionalmente seco, como en Italia y Grecia, hermosos

F I G U R A 2 7 . 1 6

cielos azules han inspirado a pintores durante siglos. Donde la atmósfera contiene mu-Cuando el aire está limpio, la dispersión

chas partículas de polvo y otras partículas más grandes que las moléculas de oxígeno de luz de alta frecuencia ofrece un cielo

azul. Cuando el aire está lleno de par-

y nitrógeno, la luz de las frecuencias más bajas también se dispersa mucho. Esto hace tículas más grandes que las moléculas,

al cielo menos azul y adopta un aspecto blancuzco. Después de una fuerte tormenta, también se dispersa la luz de frecuencia

cuando las partículas se han eliminado, el cielo se vuelve de un azul más oscuro.

más baja, la que se suma al azul para

La niebla grisácea en los cielos de las grandes ciudades es resultado de las partículas producir un cielo blancuzco.

emitidas por los motores de automóviles y camiones, y por las fábricas. Incluso cuando está al ralentí, un típico motor de gasolina de un automóvil emite más de 100 mil millones de partículas por

segundo. La mayor parte de las partículas son invisibles, pero actúan como pequeños centros hacia los cuales se adhieren otras partículas. Éstos son los principales dispersores de la luz de frecuencia más baja. Las partículas más grandes absorben la luz en vez de dispersarla, y se produce una neblina marrón. ¡Guácala!

P U N T O D E C O N T R O L

Las montañas oscuras distantes son azuladas. ¿Cuál es la fuente de este azul? (Sugerencia: ¿qué hay entre tú y las montañas que ves?)
C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Si observas montañas oscuras a la distancia, te llega muy poca luz proveniente de ellas, y predomina lo azul de la atmósfera que hay entre tú y ellas. ¡Lo azul que ***F I G U R A 2 7 . 1 7***

atribuyes a las montañas en realidad es el azul del "cielo" a baja altitud entre tú y las En las plumas de un arrendajo azul no

montañas!

hay pigmentos azules. Más bien, hay

pequeñas células alveolares en las barbas

de sus plumas que dispersan la luz,

principalmente luz de alta frecuencia.

27.7 Por qué los atardeceres son rojos

De modo que un arrendajo azul es azul

por la misma razón que el cielo es azul:

La luz que no se dispersa es luz que se transmite. Puesto que las luces roja, anaranjada dispersión.

y amarilla son las que menos dispersa la atmósfera, la luz de estas frecuencias más bajas se transmite mejor por el aire. El rojo, que se dispersa menos (y, por tanto, se transmite más), atraviesa más atmósfera que cualquier otro color. De modo que cuanto más gruesa sea la atmósfera por la cual viaja un haz de luz solar, más componentes de frecuencia más alta de la luz se dispersan del haz. Esto significa que la luz que pasa mejor es la roja. Como muestra la Figura 27.18, la luz solar viaja a través de más atmósfera al VIDEO: Por qué el cielo es azul

y por qué el atardecer es rojo

atardecer, y es por esto por lo que los atardeceres (y amaneceres) son rojos.

A mediodía, la luz solar viaja a través de una menor cantidad de atmósfera para llegar a la superficie de la Tierra. Sólo una pequeña cantidad de luz con frecuencia alta se dispersa de la luz solar, suficiente como para hacer que el Sol parezca amarillento.

A medida que el día avanza y el Sol desciende en el cielo, la trayectoria a través de la atmósfera se incrementa, y más violeta y azul se dispersan de la luz solar. La elimina-

¿Verdad que saber por qué el cielo

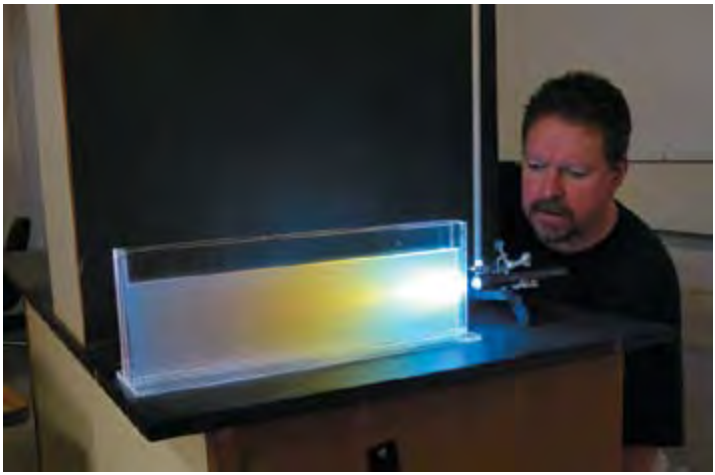
ción del violeta y el azul dejan la luz transmitida más roja. El Sol se vuelve cada vez es azul y por qué los atardeceres

más rojo, y pasa de amarillo a anaranjado y por último a un rojo-naranja al atardecer.

son rojos se suma a su belleza? El

Los atardeceres y los amaneceres son inusualmente coloridos después de una erupción conocimiento no resta, suma.

volcánica porque, entonces, en el aire son más abundantes las partículas más grandes que las moléculas atmosféricas.



C A PÍ T U LO 27 CO LO R

513

Trayectoria más larga de la luz solar a través

F I G U R A 2 7 . 1 8

de la atmósfera en el atardecer (o el amanecer)

Un rayo de Sol tiene que atravesar una

mayor cantidad de atmósfera en el atar-

decer que al mediodía. Por consiguiente,

más azul se dispersa del rayo en el atar-

Luz solar

decer que al mediodía. Para cuando el

rayo inicialmente de luz blanca llega al

suelo, sólo la luz de las frecuencias más

bajas sobrevive y produce un atardecer

rojo.

Trayectoria más corta a mediodía

Los colores del atardecer son congruentes con las reglas de la mezcla de colores.

Cuando el azul se resta de la luz blanca, el color complementario que queda es amarillo. Cuando se resta el violeta de frecuencia más alta, el color complementario resultante es anaranjado. Cuando se resta el verde de frecuencia media, queda magenta. Las El hollín atmosférico calienta la

atmósfera de la Tierra al absor-

combinaciones de los colores resultantes varían con las condiciones atmosféricas, que ber luz mientras enfría regiones

cambian día a día, lo que brinda una variedad de atardeceres para disfrutar.

locales al impedir que la luz solar

¿Por qué se ve el azul dispersado cuando el fondo es oscuro, pero no cuando el llegue al suelo. Las partículas de

fondo es claro? Porque el azul dispersado es tenue. Un color tenue se verá contra hollín en el aire pueden disparar

un fondo oscuro, pero no contra un fondo claro. Por ejemplo, cuando observas desde lluvias severas en una región y cau-la superficie de la Tierra la atmósfera contra la oscuridad del espacio, la atmósfera es sar sequías y tormentas de polvo

azul cielo. Pero los astronautas que miran hacia abajo a través de la misma atmósfera, en otra.

hacia la superficie brillante de la Tierra, no ven el mismo azul.

F I G U R A 2 7 . 1 9

El cielo del atardecer es rojo por la

ausencia de luz de alta frecuencia, que se

dispersó más lejos del horizonte.

PRACTICANDO LA FÍSICA

Para simular un atardecer, llena una pecera con agua

en la que hayas puesto un poco de leche. Algunas

gotas bastarán. Después, haz lo mismo que Dean

Baird y dirige el haz de una linterna a través del agua y

verás que parece azulado si lo miras desde un lado. Las

partículas de leche se comportan como moléculas en la

atmósfera y dispersan las frecuencias de luz más altas del

haz. La luz que sale del otro extremo del tanque tendrá

un tinte rojizo. Si miras el haz desde el extremo izquierdo

del tanque, verás un color de atardecer anaranjado. Esa es

la luz que no se dispersó.

514

PA R T E SEI S

LU Z

P U N T O D E C O N T R O L

Hay una nueva pintura marrón que

1. Si las moléculas del cielo dispersaran más luz de frecuencia baja

que luz refleja luz infrarroja, pero absorbe

de frecuencia alta, ¿de qué color sería el cielo? ¿De qué color serían los luz visible. Dado que más de la

atardeceres?

mitad de la potencia de la luz solar

está en el infrarrojo, los techos cu-

2. Las montañas distantes cubiertas de nieve reflejan mucha luz y son brillan-biertos con esta pintura se llaman

tes. Las muy distantes parecen amarillentas. ¿Por qué? (Sugerencia: ¿Qué

"techos fríos", pues reducen el

sucede con la luz blanca reflejada cuando viaja de las montañas hacia ti?) gasto de energía en acondicionadores de aire. El mismo color "frío"

de automóviles, aceras y pavimen-

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

tos también promueve la ecología

1. Si la luz de frecuencia baja se dispersara, el cielo nocturno parecería anaranjado y el cuidado del planeta.

rojizo. Al atardecer, más rojos se dispersarían por la trayectoria más larga de la luz solar, y la luz solar sería predominantemente azul y violeta. ¡De modo que los atardeceres parecerían azules!

2. Las brillantes montañas cubiertas con nieve parecen amarillas porque el azul de la luz blanca que reflejan se dispersa en su camino hacia ti. Para cuando la luz llega a ti, es débil en las frecuencias altas y fuerte en las frecuencias bajas; por tanto, es amarillenta. Las montañas cubiertas de nieve que están mucho más alejadas tienen un tinte anaranjado por la misma razón que un atardecer parece anaranjado.

27.8 Por qué las nubes son blancas

Las gotas de agua son mucho más grandes que cada una de las

moléculas y se comportan de manera diferente. En lugar de la dispersión que ocurre con las partículas diminutas, las gotas de agua principalmente refractan y reflejan la luz de todos los colores de una manera más o menos equitativa. El resultado es una nube blanca.

Cada gota absorbe una pequeña fracción de la luz que la golpea, de modo que con suficientes gotas hay mucha absorción. Es muy poca la luz que logra pasar a través de una nube muy grande, por lo que ésta parece oscura. Una nube también puede oscu-recerse si está en la sombra de otra nube. Si aumenta más el tamaño de las gotas, éstas caen en forma de lluvia.

F I G U R A 2 7 . 2 0

La próxima vez que estés admirando un nítido cielo azul, o te deleites con las for-Una nube está compuesta de gotas

mas de las nubes brillantes, u observes un hermoso atardecer, piensa en todos esos ul-de agua mucho más grandes que las

tradiminutos diapasones ópticos en vibración, ¡apreciarás todavía más estas maravillas par tículas diminutas que principal-cotidianas de la naturaleza!

mente dispersan la luz. De modo que

la reflexión y la refracción de la luz

dominan, lo que produce nubes que

generalmente son blancas.

27.9 Por qué el agua es azul verdoso

A menudo observas un hermoso azul oscuro cuando miras la superficie de un lago o el océano. Pero ese no es el color del agua; es el color reflejado por el cielo. El color del agua en sí, como puedes ver si observas un pedazo de material blanco bajo el agua, es un pálido azul verdoso.

Aunque el agua es transparente a la luz de casi todas las frecuencias visibles, absorbe intensamente ondas infrarrojas. Es por esto que las moléculas de agua resuenan a las frecuencias del infrarrojo. La energía de las ondas infrarrojas se transforma en energía interna en el agua, por lo que la luz solar calienta el agua. Las moléculas de agua resuenan un poco en el rojo visible, lo que hace que la luz roja

sea absorbida en el agua con un poco más de intensidad que la luz azul. La luz roja se reduce a un cuarto de su brillo inicial en 15 metros de agua. Hay muy poca luz roja en la luz solar que penetre por debajo de los 30 metros de agua. Cuando el rojo se elimina de la luz blanca, ¿qué color queda? Esta pregunta puede plantearse de otra forma: ¿cuál es el color complementario

C A PÍ T U LO 27 CO LO R

515

del rojo? El color complementario del rojo es el cian: verde azulado. En el agua de mar, todo a estas profundidades tiene color cian.

Muchos cangrejos y otras criaturas marinas que parecen negras en el agua profunda se descubre que son rojas cuando suben a la superficie. A estas profundidades, negro Los colores otoñales de algunos

árboles se deben al rompimiento

y rojo parecen iguales. Al parecer, el mecanismo de selección de la evolución no podía de la clorofila de sus hojas y a la

distinguir entre negro y rojo a tales profundidades del océano.

redistribución de nutrientes hacia

Si bien el color verde-azulado del agua se produce por la absorción selectiva de la las raíces del árbol para almacenar-luz, el azul asombrosamente vívido de los lagos de las Montañas Rocosas canadien-los en el invierno. A medida que

ses se debe a la dispersión.3 Los lagos se alimentan de escurrimientos de los glaciares el verde se extrae de las hojas, el

amarillo comienza a aparecer, que

puede cambiar a rojo, anaranjado

o morado por la acidez de otras

sustancias químicas de la hoja. De

modo que cada otoño, los árboles

se preparan para el invierno "dur-

miendo" en un manto de gloria

flamígera.

F I G U R A 2 7 . 2 1

El agua es cian porque absorbe la luz

roja. La espuma de las olas es blanca

porque, al igual que las nubes, está

compuesta de varias gotas de agua

diminutas que dispersan la luz de todas

las frecuencias visibles.

fundidos que contienen finas partículas de cieno, denominado harina de roca, que queda suspendido en el agua. La luz se dispersa en estas pequeñas partículas y brinda al agua su color extrañamente vívido (Figura 27.22). (¡A los turistas que fotografían estos lagos se les aconseja informar a sus procesadores de fotografías que no ajusten el color a un azul "real"!)

Es bastante interesante que el color que vemos no es el que está en el mundo a nuestro alrededor; el color está en nuestras cabezas. El mundo está lleno de un montaje de vibraciones: ondas electromagnéticas que estimulan la sensación de color cuando las vibraciones actúan de manera recíproca con las antenas de recepción de forma cónica de las retinas de nuestros ojos. Qué bueno que las interacciones ojo-cerebro producen los hermosos colores que vemos.

F I G U R A 2 7 . 2 2

El extraordinario azul de los lagos de

las Montañas Rocosas canadienses se

produce por la dispersión de partículas

P U N T O D E C O N T R O L

extremadamente finas de cieno glacial

De estas fuentes de luz azul (a) una pantalla de televisión, (b) el cielo y suspendido en el agua.

(c) los lagos de las Montañas Rocosas canadienses, ¿cuáles se deben a dispersión?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

(b) y (c).

3La dispersión por pequeñas partículas ampliamente espaciadas en los iris de los ojos azules, en lugar de algún pigmento, explican su color. La absorción por pigmentos explica los ojos color café.

516

51

PA R T E SEI S

LU Z

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)
Colores primarios aditivos. Los tres colores (rojo, azul y

Colores primarios sustractivos. Los tres colores de

verde) que, cuando se suman en ciertas proporciones, produ-

pigmentos absorbentes (magenta, amaril o y cian) que,

cen cualquier otro color en la parte de luz visible del espectro

cuando se mezclan en ciertas proporciones, pueden reflejar

electromagnético y pueden mezclarse de manera equitativa

cualquier otro color en la parte de luz visible del espectro

para producir luz blanca.

electromagnético.

Colores complementarios. Cualesquiera dos colores de igual

bril o que, cuando se suman, producen la sensación de luz

blanca.

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N) 27.1 Color en el mundo

27.5 Mezcla de pigmentos de colores

1. ¿Cuál tiene la frecuencia más alta: la luz roja o la luz azul?

16. Cuando algo se pinta de rojo, ¿cuál color se absorbe más?

27.2 Reflexión selectiva

17. ¿Qué son los colores primarios sustractivos?

2. ¿Qué ocurre cuando los electrones exteriores que zum-

18. Si observas con una lupa las imágenes de un libro o revista

ban alrededor del núcleo atómico encuentran ondas

que se imprimen a todo color, observarás tres colores de

electromagnéticas?

tinta más el negro. ¿Cuáles son estos colores?

3. ¿Qué sucede con la luz cuando cae sobre un material que

27.6 Por qué el cielo es azul

tiene una frecuencia natural igual a la frecuencia de la luz?

19. ¿Cuál interactúa más con los sonidos de tono alto:

4. ¿Qué sucede con la luz cuando cae sobre un material que

las campanas pequeñas o las campanas grandes?

tiene una frecuencia natural por arriba o debajo de la fre-

20. ¿Cuáles interactúan más con la luz de alta frecuencia: las

cuencia de la luz?

partículas pequeñas o las partículas grandes?

27.3 Transmisión selectiva

21. ¿Por qué el cielo normalmente parece azul?

5. ¿Qué color de luz se transmite a través de un pedazo de

22. ¿Por qué el cielo en ocasiones parece blancuzco?

vidrio rojo?

27.7 Por qué los atardeceres son rojos

6. ¿De qué manera un pigmento afecta la luz?

23. ¿Por qué el Sol parece rojizo al atardecer y al amanecer,

7. ¿Cuál se calienta con más rapidez en la luz solar: un

pero no al mediodía?

pedazo de vidrio sin color o uno con color? ¿Por qué?

24. ¿Por qué el color de los atardeceres varía de un día a otro?

27.4 Mezcla de luces de colores

27.8 Por qué las nubes son blancas

8. ¿Cuál es la evidencia que sustenta la afirmación de que la

25. ¿Qué explica lo blanco de una nube, la dispersión o la

luz blanca está compuesta de todos los colores del espectro?

reflexión?

9. ¿Cuál es el color del pico de frecuencia de la radiación solar?

26. ¿Cuál es el efecto sobre el color de una nube cuando ésta

10. ¿A qué color de luz son más sensibles tus ojos?

contiene abundantes gotas grandes?

11. ¿Qué es una curva de radiación?

12. ¿Qué rangos de frecuencia de la curva de radiación ocu-

27.9 Por qué el agua es azul verdoso

pan las luces roja, verde y azul?

27. ¿Qué parte del espectro electromagnético es más absorbi-

13. ¿Por qué al rojo, el verde y el azul se les llama colores pri-

da por el agua?

marios aditivos?

28. ¿Qué parte del espectro electromagnético visible es más

14. ¿Cuál es el color resultante de intensidades iguales de luz

absorbido por el agua?

roja y luz cian combinadas?

29. ¿Qué color resulta cuando el rojo se sustrae de la luz blanca?

15. ¿Por qué al rojo y al cian se les llama colores

30. ¿Por qué el agua parece cian?

complementarios?

P I E N S A Y R E A L I Z A (A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 31. *Mira fijamente una hoja de papel de color más o menos*

una superficie blanca. Esto ocurre porque los conos fatiga-

durante 45 segundos. Luego observa una superficie toda

dos envían una señal más débil al cerebro. Todos los colores

blanca. Los conos en tu retina que son receptivos al color

producen blanco, pero todos los colores menos uno produ-

del papel se fatigan (se agota una sustancia química que

cen el complemento del color faltante. ¡Inténtalo y observa!

percibe la luz y que se repone en forma lenta), por lo que ves

32. Recorta un disco de algunos centímetros de diámetro en

una post-imagen del color complementario cuando miras

un pedazo de cartulina; perfora dos orificios un poco lejos

C A PÍ T U LO 27 R E V ISI Ó N

517

del centro, del tamaño suficien-

33. Cubre los extremos de un tubo de cartón con papel

te para que pase un trozo de

metálico. Luego, con un lápiz, perfora un orificio en

cordel como se muestra en el

cada extremo, uno aproximadamente de 3 milímetros de

dibujo. Gira el disco como se

diámetro y el otro el doble de grande. Acércate al orificio

muestra, de modo que la cuerda

pequeño y mira por el tubo los colores de las cosas contra

se enrede como una banda de

el fondo negro del tubo. Verás colores que parecen muy

caucho sobre un avión de mode-

diferentes de cómo aparecen contra fondos ordinarios.

lismo. Luego, si jalas la cuerda

34. Envía un mensaje a la abuela y cuéntale qué detalles

para tensarla, el disco girará.

aprendiste que explican por qué el cielo es azul, los atar-

Si la mitad del disco es de color amarillo y la otra mitad es

deceres son rojos y las nubes son blancas. Analiza si esta

azul, cuando gire los colores se mezclarán y parecerá casi
información aumenta o disminuye tu percepción de la
blanco. (Cuán cerca del blanco depende de los tonos de los
belleza de la naturaleza.
colores.) Intenta esto para colores complementarios.

P I E N S A Y E X P L I C A (S Í N T E S I S)

35. ¿Qué color de luz visible tiene la longitud de onda más
49. ¿Qué color de luz se transmitirá a través de filtros cian y
larga? ¿La longitud de onda más corta?
magenta traslapados?
36. ¿Por qué los científicos del color no mencionan el negro y
50. Observa tus pies rojos quemados por el Sol cuando están
el blanco como colores?
bajo el agua. ¿Por qué no se ven tan rojos como cuando
37. ¿Por qué los interiores de los instrumentos ópticos son
están afuera del agua?
intencionalmente negros?
51. ¿Por qué la sangre de los buzos lesionados en aguas pro-
38. Los camiones de bomberos solían ser rojos. Ahora el color
fundas parece de color negro verdosa en las fotografías
preferido es amarillo-verde. ¿Por qué el cambio?
submarinas tomadas con luz natural, pero roja cuando se
39. Las pelotas de tenis solían ser blancas. ¿Cuál es su color
usa flash?

actual y por qué?

52. Con referencia a la Figura 27.9, completa las siguientes

40. ¿De qué color parece ser la ropa roja cuando se ilumina

ecuaciones:

con luz solar? ¿Con luz de una señal de neón roja? ¿Con

Luz amarilla luz azul luz

luz cian?

Luz verde luz

luz blanca

41. ¿Por qué una hoja de papel blanca parece blanca en luz

Magenta amarilla cian luz

blanca, roja en luz roja, azul en luz azul, y así sucesiva-

mente con cada color?

53. Revisa la Figura 27.9 para ver si los primeros tres enuncia-

42. Un proyector está cubierto de modo que no transmitirá

dos son correctos. Luego completa el último enunciado.

luz amarilla desde su filamento al rojo blanco. ¿De qué

(Todos los colores se combinan por la adición de luz.)

color es el haz de luz saliente?

Rojo verde azul blanco

43. ¿Cómo podrías aprovechar los proyectores en una obra de

Rojo verde amarillo blanco azul

teatro para cambiar de manera súbita el vestuario de los

Rojo azul magenta blanco verde

actores de amarillo a negro?

Verde azul cian blanco

44. ¿La televisión de color funciona mediante adición de

color o sustracción de color? Defiende tu respuesta.

54. Tu amigo dice que las luces roja y cian producen luz

45. En una pantalla de televisión, puntos rojos, verdes y azu-

blanca porque el cian es verde azul y, por tanto, rojo

les de materiales fluorescentes se iluminan con una diver-

verde azul blanco. ¿Estás de acuerdo o en desacuer-

sidad de intensidades relativas para producir un espectro

do, y por qué?

completo de colores. ¿Qué puntos se activan para produ-

55. Cuando luz blanca alumbra sobre tinta roja seca sobre

cir amarillo? ¿Magenta? ¿Blanco?

una placa de vidrio, el color que se transmite es rojo. Pero

46. ¿Qué colores de tinta usan las impresoras de inyección de

el color que se refleja no es rojo. ¿Cuál es?

tinta para producir un rango completo de colores? ¿Los

56. En la playa, puedes quemarte con el Sol mientras estás

colores se forman con la adición de color o la sustracción

bajo la sombra de una sombrilla. ¿Cuál es tu explicación?

de color?

57. En ocasiones, los pilotos usan gafas que transmiten luz

47. El alumbrado público que utiliza vapor de sodio a presión

amarilla y absorben luz de la mayoría de los demás colo-

alta produce luz que es principalmente amarilla con algo

res. ¿Por qué esto los ayuda a ver con más claridad?

de rojo. ¿Por qué las patrullas de policía color azul oscu-

58. ¿La luz viaja más rápido a través de la atmósfera inferior o

ro no son aconsejables en una comunidad que usa este

a través de la atmósfera superior?

alumbrado público?

59. Tu amigo dice que la razón por la que las montañas oscu-

48. ¿En cuál de estos casos un plátano maduro parecerá negro:

ras distantes parecen azules es porque miras el cielo entre

cuando se ilumina con luz roja, amarilla, verde o azul?

tú y las montañas. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo?

518

PA R T E SEI S

LU Z

60. ¿Por qué el humo de una fogata parece azul contra los

66. Las partículas muy grandes, como las gotas de agua,

árboles cerca del suelo, pero amarillo contra el cielo?

absorben más radiación de la que dispersan. ¿Cómo se

61. Comenta este enunciado: "Oh, ese hermoso atardecer

relaciona esto con la oscuridad de las nubes de lluvia?

rojo son sólo los colores restantes que no se dispersaron

67. ¿Cómo se vería la blancura de la nieve si la atmósfera de

en su camino a través de la atmósfera".

la Tierra fuese varias veces más densa?

62. Si el cielo en un determinado planeta del sistema solar

68. La atmósfera de Júpiter tiene más de 1,000 km de grosor.

usualmente fuese anaranjado, ¿de qué color serían los

Desde la superficie de Júpiter, ¿esperarías ver un Sol blanco?

atardeceres?

69. Los amaneceres son rojos por la misma razón que los

63. Las emisiones volcánicas arrojan finas cenizas en el aire

atardeceres son rojos. Pero los atardeceres suelen ser más

que dispersan la luz roja. ¿De qué color se verá una Luna

coloridos que los amaneceres, en especial cerca de las ciu-

llena a través de estas cenizas?

dades. ¿Cuál es tu explicación?

64. ¿Qué explica que algunas nubes sean blancas y otras

70. Le explicas a un niño en la playa por qué el agua tiene

oscuras?

color cian. El niño apunta a las partes blancas de las olas

65. ¿Por qué la espuma de la cerveza de raíz es blanca, en

que revientan y te pregunta por qué son blancas. ¿Cuál es

tanto que la bebida es marrón oscuro?

tu respuesta?

P I E N S A Y D I S C U T E (E V A L U A C I Ó N)

71. En una boutique que sólo tiene iluminación fluorescen-

combinación de rojo y azul, y el amarillo es una com-

te, una cliente insiste en llevar un vestido a la puerta de

binación de rojo y verde, y que el color común es rojo.

entrada para verlo a la luz del día y comprobar su color.

¿Estás de acuerdo o en desacuerdo, y por qué?

Discute si tiene razón.

78. En una de las fotografías al inicio de este capítulo aparece

72. ¿Por qué la pintura roja es roja?

la escritora científica Suzanne Lyons con su hijo Tristán,

73. ¿Por qué las hojas de una rosa roja se calentarán más que

quien viste de rojo, y su hija Simone, quien viste de verde.

los pétalos cuando se iluminan con luz roja? Discute

Observa que el negativo de la fotografía muestra estos

cómo se relaciona esto con las personas en el desierto

colores de manera diferente. Discute y explica.

caliente que usan ropas blancas.

79. Observa con atención una bandera estadounidense.

74. Si la luz solar de algún modo fuese verde en lugar de

Luego voltea la vista hacia un área blanca sobre una

blanca, ¿qué color de ropa sería más aconsejable en un

pared. ¿Qué colores que ves en la imagen de la bandera

incómodo día caluroso? ¿En un día muy frío?

aparecen sobre la pared?

75. La curva de radiación del Sol (consulta las Figuras 27.7 y

80. ¿Por qué no puedes ver las estrellas durante el día?

27.8) muestra que la luz más brillante del Sol es amarillo-

81. ¿Por qué el cielo es de un azul más oscuro cuando estás a

verde. ¿Por qué entonces el Sol no se ve amarillo-verde?

mayores altitudes? (Sugerencia: ¿de qué color es el "cielo"

76. Supón que dos haces de linterna alumbran sobre una

en la Luna?)

pantalla blanca, uno a través de un panel de vidrio azul y

82. En la Luna no hay atmósfera que produzca dispersión de

el otro a través de un panel de vidrio amarillo. ¿Qué color

la luz. Discute cómo se vería el cielo diurno de la Luna si

aparece sobre la pantalla donde los dos haces se traslapan?

se viera desde la superficie de la Luna.

En vez de ello, supón que los dos paneles de vidrio se

83. ¿Las estrellas pueden verse desde la superficie de la Luna

colocan en el haz de una sola linterna. Discute qué colo-

en el "día", cuando brilla el Sol?

res aparecen entonces.

84. Discute el color de la puesta de Sol vista desde la Luna.

77. Tu amigo razona que la mezcla de pinturas magenta

y amarillo producirá rojo, porque el magenta es una

ACID TO
WATER

C A P Í T U L O 2 8

Reflexión y

refracción

2

28.1 Reflexión

3

28.2 La ley de reflexión

28.3 Refracción

28.4 La causa de la refracción

28.5 La dispersión y los arcoíris

28.6 Reflexión total interna

28.7 Lentes

28.8 Defectos en las lentes

4

1 Peter Hopkinson despierta el interés de los alumnos con esta alocada demostración de pararse a horcajadas sobre un gran

espejo al tiempo que levanta la pierna derecha mientras la pierna

izquierda, que no se ve, le brinda apoyo detrás del espejo. 2 ¿Por qué las patas del pato, pero no sus pies, se ven en el reflejo? 3 El profesor de física Fred Myers está de pie entre espejos paralelos y

toma una fotografía de su hija McKenzie, quien es ingeniera en

diseño. 4 ¿Cuántos espejos producen estas reflexiones múltiples de la profesora de física texana Karen Jo Matsler?

520

PA R T E SEI S

LU Z

Para los matemáticos, Fermat es mejor recordado por su

famoso “último teorema”, del cual un caso especial afirma

El abogado y matemático francés Pierre de Fermat

nació en 1601. Asistió a la Université de Toulouse

antes de mudarse a Bordeaux en su segundo dece-

que la suma de dos cubos de números enteros no puede ser

nio de vida. Hablaba latín, griego, italiano y español, y fue

igual al cubo de otro número entero. Durante más de 300

muy reconocido por sus versos escritos en varios idiomas.

años, los matemáticos estuvieron atormentados por una nota

En 1629 realizó importantes al margen escrita en latín en uno de los libros de Fermat, que trabajos matemáticos acerse tradujo como: “tengo una prueba verdaderamente magní-

ca de las ideas de máximos y

fica de esta premisa que no cabe en este estrecho margen". El

mínimos que resultaron ser teorema no se demostró sino hasta 1994 (por parte de Andrew de utilidad para Newton, así Wiles, de la Universidad de Princeton) con métodos que no como para Leibniz, cuando de

estaban al alcance de Fermat, de modo que parece improba-

manera independiente desa-

ble que Fermat en realidad haya tenido una prueba. Esto no

rrollaron el cálculo. A través disminuye el genio que mostró en muchas otras formas.

de su correspondencia con

Fermat tuvo una manera única de observar las trayectorias de

Blaise Pascal en 1654, Fermat

luz. Afirmó que, de todas las posibles trayectorias que la luz pue-

ayudó a sentar los cimientos de recorrer de un punto a otro, recorre la trayectoria que necesita fundamentales de la teoría de

el tiempo mínimo. La reflexión y la refracción, los temas cen-

la probabilidad.

trales de este capítulo, se entienden muy bien con este principio.

28.1 Reflexión

Casi ninguna de las cosas que ves a tu alrededor emite luz propia. Son visibles porque reemiten la luz que llega a su superficie procedente de una fuente primaria, como el Sol, una lámpara o una fuente secundaria, como el cielo iluminado. Cuando la luz cae sobre la superficie de un material, o se reemite sin cambio de frecuencia, se absorbe en el material y se convierte en calor.1 Se dice que la luz se refleja cuando regresa hacia el medio del cual provino; este proceso es la reflexión.

Cuando la luz solar o la luz de una lámpara alumbran la impresión

sobre una página de papel, los electrones de los átomos del papel y la tinta vibran de modo más enérgico en respuesta a los campos eléctricos oscilatorios de la luz que ilumina. Los electrones energizados reemiten la luz por medio de la cual ves la página. Cuando la página se ilumina con luz blanca, el papel se ve blanco, lo cual revela que los electrones reemiten todas las frecuencias visibles. Ocurre muy poca absorción. La tinta es otra historia. Ex-F I G U R A 2 8 . 1

cepto por un poco de reflexión, ésta absorbe todas las frecuencias visibles y, por tanto, La luz interactúa con los átomos al

se ve negra.

igual que el sonido interactúa con los

diapasones.

Principio del tiempo mínimo2

La idea de que la luz toma la ruta más rápida cuando va de un lugar a otro la formuló B

Pierre de Fermat. Su idea se llama ahora principio del tiempo mínimo de Fermat.

La reflexión puede entenderse con el principio de Fermat. Piensa en la siguiente si-A

tuación: en la Figura 28.2 se ven dos puntos, A y B, y un espejo plano ordinario debajo.

¿Cómo se puede ir de A a B con la mayor rapidez; esto es: en el menor tiempo? La respuesta es muy simple: ¡ve recto de A a B! Pero, si agregas la condición de que la luz debe Espejo

golpear el espejo cuando va de A a B en el menor tiempo, la respuesta no es tan sencilla.

Una forma sería ir lo más rápido posible hasta el espejo y luego a B, como se muestra con F I G U R A 2 8 . 2

las líneas sólidas de la Figura 28.3. Ésta constituye una trayectoria corta hasta el espejo, 1Otro destino menos común es la absorción seguida de la reemisión a frecuencias más bajas: fluorescencia (consulta el Capítulo 30).

2Este material y muchos de los ejemplos de tiempo mínimo se adaptaron de R. P. Feynman, R. B. Leighton y M.

Sands, The Feynman Lectures on Physics, Vol. I, Cap. 26 (Reading, MA: Addison-Wesley, 1963).

C A PÍ T U LO 28 R EFL E X I Ó N Y R EFR ACCI Ó N

521

pero una trayectoria muy larga del espejo a B. Si en vez de ello consideras un punto sobre B

el espejo un poco hacia la derecha, aumentas ligeramente la primera distancia, pero se reduce mucho la segunda distancia, de modo que la longitud de la trayectoria total que A

se muestra con las líneas discontinuas, y en consecuencia el tiempo de viaje, es menor.

¿Cómo puedes encontrar el punto exacto sobre el espejo con el cual el tiempo sea mínimo? Puedes encontrarlo con mucha facilidad con un truco geométrico.

Espejo

En el lado opuesto del espejo, construye un punto artificial, B9, que esté a la misma distancia "a través" y abajo del espejo que el punto B que está arriba del espejo F I G U R A 2 8 . 3

(Figura 28.4). La distancia más corta entre A y este punto artificial B9 es muy simple de determinar: es una línea recta. Ahora, esta línea recta interseca el espejo en el punto B

C, el punto preciso de reflexión para la trayectoria más corta y, por tanto, la trayectoria de tiempo mínimo para el paso de luz de A a B.

Un análisis atento demostrará A

que la distancia de C a B es igual a la distancia de C a B9. Se observa que la longitud de la trayectoria de A a B9 a través de C es igual a la longitud de la trayectoria de A a B rebotando en el punto C.

C

Un análisis atento de las Figuras 28.4 y 28.5 y un poco de razonamiento geométrico demostrarán que el ángulo de la luz incidente de A a C es igual al ángulo de reflexión de C a B.

B′

F I G U R A 2 8 . 4

B

B

A

B

A

A

C

C

C

B′

B′

B′

F I G U R A 2 8 . 5

28.2 La ley de reflexión

Los recubrimientos blancos de los

Como lo demostró Fermat, el ángulo de la luz incidente será el

mismo que el ángulo techos reflejan hasta 85% de la

luz incidente, lo que en los días de

de la luz reflejada. Ésta es la ley de reflexión y se sostiene para todos los ángulos verano reduce mucho los costos del

(Figura 28.5):

aire acondicionado y las emisiones

de carbono. Sin embargo, en los días

El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

fríos de invierno, cuando lo que se

En la Figura 28.6 se ilustra la ley de reflexión con flechas que representan rayos desea es calor, ésta no es tan buena

idea. De modo que, en las regiones

de luz. En lugar de medir los ángulos de los rayos incidente y reflejado desde la su-con veranos cálidos e inviernos

perficie reflectora, es habitual medirlos desde una línea perpendicular al plano de ligeros, ¡pinta los techos de blanco!

la superficie reflectora. Esta línea imaginaria se llama normal. El rayo incidente, la (Como se mencionó en el Capítulo 27,

normal y el rayo reflejado se encuentran en el mismo plano. A tal reflexión desde también hay nuevas pinturas marrón

una superficie lisa se le denomina reflexión especular. Los espejos producen excelentes que ayudan a enfriar mediante el

reflejo de la luz infrarroja.)

reflexiones especulares.

Ángulo de

Rayo incidente

Ángulo de

incidencia

reflexión

SCREENCAST: Reflexión

Normal

Rayo reflejado

F I G U R A 2 8 . 6

La ley de reflexión.

Espejo

522

PA R T E SEI S

LU Z

P U N T O D E C O N T R O L

La construcción del punto artificial B' en las Figuras 28.4 y 28.5 muestra cómo la luz se encuentra con el punto C al reflejarse de A a B. Mediante una construcción similar, demuestra que la luz que se origina en B y se refleja en A también se encuentra con el mismo punto C.

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Construye un punto artificial A' tan abajo del espejo como A está por arriba de él; luego dibuja una línea recta de B a A' para encontrar C, como se muestra a la izquierda. Ambas construcciones superpuestas, a la derecha, muestran que C es común a ambas. Se ve que la luz seguirá la misma trayectoria si va en la dirección opuesta.

Siempre que veas a los ojos de alguien más en un espejo, ten por seguro que la persona también puede verte a los ojos.

A

B

B

A

C

C

A′

A′

B′

Espejo

Espejos planos

Supón que la llama de una vela se coloca frente a un espejo plano. Los rayos de luz irra-Objeto

Imagen

dian de la llama en todas direcciones. La Figura 28.7 sólo muestra cuatro del infinito número de rayos que salen de uno del infinito número de puntos sobre la vela. Estos rayos divergen de la llama de la vela y encuentran el espejo, donde se reflejan en ángulos iguales a sus ángulos de incidencia. Los rayos divergen del espejo y parecen emanar de un punto particular detrás del espejo (donde intersecan las líneas discontinuas). El observador ve una imagen de la llama en este punto. Los rayos de luz en realidad no F I G U R A 2 8 . 7

se originan en este punto, de modo que la imagen se llama imagen virtual. La imagen Una imagen virtual se forma detrás del

está tan atrás del espejo como el objeto está enfrente del espejo, y la imagen y el objeto espejo y se ubica en la posición donde

tienen el mismo tamaño. Cuando te ves en un espejo, por ejemplo, el tamaño de tu convergen los rayos reflejados extendi-imagen es el mismo que el tamaño que parecería tener tu gemelo si se ubicara a la dos (líneas discontinuas).

misma distancia detrás del espejo que a la que tú estás enfrente del espejo, siempre y cuando el espejo sea plano.

Cuando el espejo es curvo, los tamaños y las distancias del objeto y la imagen ya no son iguales. En este texto no se abordarán los espejos curvos, excepto para decir que la F I G U R A 2 8 . 8

La imagen de Marjorie está tan atrás del espejo como ella está enfrente. Observa que ella y su imagen tienen el mismo color de ropa, evidencia de que la luz no cambia de frecuencia en la reflexión. Es interesante que su eje izquierda-derecha no esté invertido al igual que su eje arriba-abajo. El eje que sí se invierte, como se muestra a la derecha, es el eje atrás-adelante. Por esta razón parece como si su mano izquierda estuviera enfrente de la mano derecha de su imagen.

ley de reflexión todavía se aplica. Un espejo curvo se comporta como una sucesión de espejos planos, cada uno en una orientación angular ligeramente diferente del que le sigue. En cada punto, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión (Figura 28.9). Observa que, en un espejo curvo, a diferencia de un espejo plano, las normales (que se muestran con las líneas negras discontinuas a la izquierda del espejo) en dife-VIDEO: Formación de imágenes

en un espejo

rentes puntos sobre la superficie no son paralelas entre sí.

F I G U R A 2 8 . 9

(a) La imagen virtual formada por un

espejo convexo (un espejo que se curva

hacia afuera) es más pequeña y está más

cerca del espejo que el objeto.

(b) Cuando el objeto está cerca de un

espejo cóncavo (un espejo que se curva

hacia adentro, como una “cueva”), la

imagen virtual es más grande y está más

(a)

(b)

lejos que el objeto. En ambos casos, la

ley de reflexión se aplica a cada rayo.

Sin importar si el espejo es plano o curvo, el sistema ojo-cerebro no puede normalmente diferenciar entre un objeto y su imagen reflejada. Así que la ilusión de que existe un objeto detrás de un espejo (o en algunos casos, enfrente de un espejo cóncavo) se debe tan sólo al hecho de que la luz proveniente del objeto entra en el ojo exactamente de la misma manera, en términos físicos, como habría entrado si el objeto en realidad estuviera en la ubicación de la imagen.

Sólo parte de la luz que golpea una superficie se refleja. Sobre una superficie de vidrio transparente, por ejemplo, y con incidencia normal (luz perpendicular a la superficie), sólo alrededor de 4% se refleja en cada superficie. Sin embargo, en una superficie limpia y pulida de aluminio o plata, se refleja alrededor de 90% de la luz incidente.

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Qué evidencia puedes citar que sustente la afirmación de que la frecuencia de la luz no cambia al momento de reflejarse?

2. Si quieres tomar una fotografía de tu imagen mientras estás parado 5 m enfrente de un espejo plano, ¿a qué distancia deberás montar tu cámara para obtener el enfoque más nítido?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. El color de una imagen es idéntico al color del objeto que forma la imagen.

Cuando te miras en un espejo, por ejemplo, el color de tus ojos no cambia.

2. Monta tu cámara a 10 m; la situación es equivalente a estar de pie a 5 m enfrente de una ventana abierta y ver a tu gemelo de pie a 5 m de la ventana.

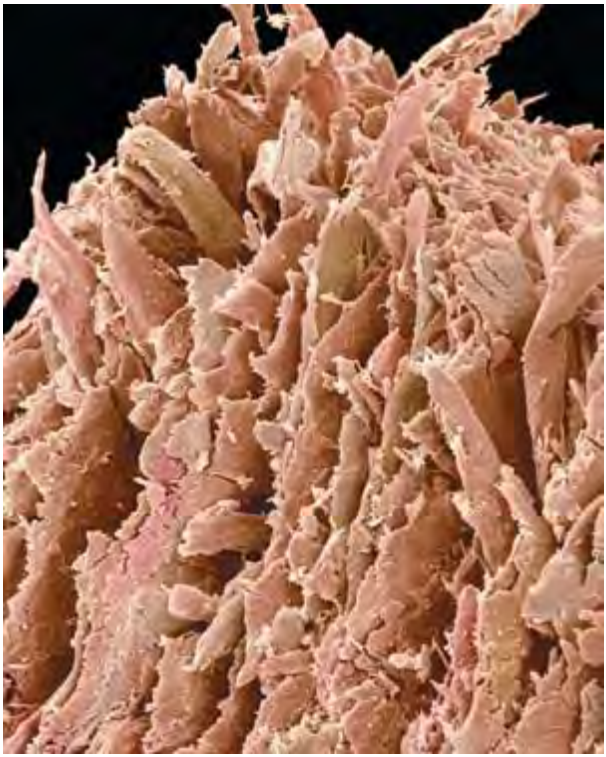
Reflexión difusa

Cuando la luz incide sobre una superficie rugosa o granular, se

refleja en muchas direcciones. A esto se le llama reflexión difusa (Figura 28.10). Si la superficie es tan lisa que las distancias entre elevaciones sucesivas sobre la superficie son menores que alrededor de un octavo F I G U R A 2 8 .1 0

de la longitud de onda de la luz, hay muy poca reflexión difusa, y se dice que la superficie Reflexión difusa. Si bien cada rayo está pulida. Por tanto, una superficie puede pulirse para una radiación con una longitud de obedece la ley de reflexión, los muchos y diferentes ángulos superficiales que

onda larga pero no puede pulirse para una luz con una longitud de onda corta. El "plato" encuentran los rayos de luz cuando de mal a de alambre que se muestra en la Figura 28.11 es muy rugoso para las ondas de golpean la superficie rugosa producen luz, por lo que difícilmente sería como un espejo, pero para las ondas de radio con longitud reflexión en muchas direcciones.



524

PA R T E SEI S

LU Z

F I G U R A 2 8 . 1 1

de onda larga, está “pulido” y, por tanto, es un excelen-

El plato parabólico de malla abierta es

te reflector. La reflexión de las paredes de tu habitación

un reflector difuso para la luz con lon-

es un buen ejemplo de reflexión difusa. La luz se refleja

gitud de onda corta, pero un reflector

de vuelta hacia la habitación pero no produce imágenes

pulido para ondas de radio con longitud

especulares. A diferencia de la reflexión especular, la re-

de onda larga.

flexión difusa no produce una imagen especular.

La luz que se refleja de esta página es difusa. La

página puede ser lisa para una onda de radio, pero

es rugosa para una onda de luz. Los rayos de luz que

golpean esta página encuentran millones de pequeñas

superficies planas que miran en todas direcciones. Por

tanto, la luz incidente se refleja en todas direcciones,

lo que te permite ver la página u otros objetos desde

cualquier dirección. Por ejemplo, puedes ver el camino

delante de tu automóvil en la noche por la reflexión

difusa de la superficie del camino. Cuando el camino está húmedo, la reflexión difusa es menor y es más difícil ver. La mayor parte de tu entorno se ve gracias a la reflexión difusa.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Cómo es que la superficie del agua de un lago puede mostrar tanto reflexión especular como difusa?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Donde el agua está muy tranquila y la superficie está lisa, ocurren imágenes refleja-F I G U R A 2 8 . 1 2

das. Esta es reflexión especular. Donde el agua es rugosa y no muestra imágenes Vista amplificada de la superficie del

reflejadas, la reflexión es difusa.

papel ordinario.

28.3 Refracción

Recuerda del Capítulo 26 que la rapidez promedio de la luz es más baja a través de vidrio y otros materiales transparentes que a través del espacio vacío. La luz viaja con distintas Salvavidas

A

rapideces en diferentes materiales. Viaja a 300,000 km/s en el vacío, con una rapidez un poco menor en el aire, y a tres cuartos de dicha rapidez en el agua. En un diamante, Arena

la luz viaja a cerca de 40% de su rapidez en el vacío. Cuando la luz se dobla al pasar de Agua

manera oblicua de un medio a otro, el proceso se llama refracción. Es común observar que un rayo de luz se doble y tome una ruta más larga cuando encuentra vidrio o agua Persona en peligro B

en un ángulo oblicuo. No obstante, la trayectoria más larga tomada es, a pesar de ello, la trayectoria que necesita el tiempo mínimo. Una trayectoria en línea recta tardaría un F I G U R A 2 8 . 1 3

tiempo más prolongado. Esto se puede ilustrar con la siguiente situación.

Refracción.

Imagina que eres un salvavidas en una playa y observas que una persona corre peligro en el agua. En la Figura 28.13 se muestran tu posición relativa, la de la orilla de la playa y la de la persona en peligro. Tú estás en el punto A y la persona está en el punto B. Puedes correr más rápido de lo que puedes nadar. ¿Debes viajar en línea recta para llegar a B?

Ángulo de

Un poco de razonamiento demostrará que una trayectoria en línea recta no sería la me-incidencia

jor opción porque, si en vez de ello destinaras un poco más de tiempo para desplazarte Normal

más en tierra, ahorrarías mucho más tiempo porque nadarías una distancia más corta Aire

en el agua. La trayectoria del tiempo mínimo se muestra con la línea discontinua, que evi-Agua

dentemente no es la de la distancia más corta. Desde luego, la cantidad de curvatura en Ángulo de

la orilla de la playa depende de cuánto más rápido puedas correr que nadar. La situación refracción

es similar con un rayo de luz incidente sobre un cuerpo de agua, como se muestra en la Figura 28.14. El ángulo de incidencia es mayor que el ángulo de refracción por una F I G U R A 2 8 . 1 4

cantidad que depende de las rapideces relativas de la luz en el aire y en el agua.

Refracción.

Considera el panel de vidrio grueso de la Figura 28.15. Cuando la luz pase del punto A y atraviese el vidrio hasta el punto B, irá en una trayectoria en línea recta. En este

caso, la luz encuentra el vidrio perpendicularmente, y se ve que la distancia más corta tanto a través del aire como del vidrio corresponde al tiempo más corto. Pero, ¿qué hay Aire

Vidrio Aire

A

B

de la luz que va del punto A al punto C? ¿Viajará en la línea recta mostrada por la línea discontinua? La respuesta es no, porque si lo hace así pasaría más tiempo dentro del vidrio, donde la luz viaja con más lentitud que en el aire. En vez de ello, la luz tomará una trayectoria menos inclinada a través del vidrio. El tiempo ahorrado al tomar la a

c

trayectoria resultante más corta a través del vidrio compensa con creces el tiempo que fue necesario agregar para recorrer la trayectoria un poco más larga a través del aire.

C

La trayectoria global es la trayectoria del tiempo mínimo, la trayectoria más rápida. El resultado es un desplazamiento paralelo del haz de luz porque los ángulos de entrada y salida son iguales. Notarás este desplazamiento cuando observes a través de un panel F I G U R A 2 8 .1 5

grueso de vidrio en un ángulo. Cuanto más difiera de la perpendicular tu ángulo de Refracción a través de vidrio. Aunque la línea discontinua AC es la trayectoria

visión, más pronunciado será el desplazamiento.

más corta, la luz toma una trayectoria

Otro ejemplo de interés es el prisma, en el cual las caras opuestas del vidrio no son un poco más larga a través del aire desde paralelas (Figura 28.16). La luz que va del punto A al punto B no seguirá la trayectoria A hasta a, luego una trayectoria más en línea recta mostrada con la línea discontinua porque pasaría demasiado tiempo en corta a través del vidrio hasta c, y luego el vidrio. En vez de ello, la luz seguirá la trayectoria que se muestra con la línea sólida, a C. La luz que sale está desplazada, una trayectoria que es un poco más larga a través del aire y atraviesa una sección más pero es paralela a la luz incidente.

delgada del vidrio para llegar al punto B. Mediante este razonamiento, uno podría pensar que la luz debe tomar una trayectoria más cercana al vértice superior del prisma y buscar el grosor mínimo del vidrio. Pero si lo hiciera, la distancia adicional a través del aire resultaría en un tiempo de viaje global más largo. La trayectoria más rápida seguida es la trayectoria que tarda el tiempo mínimo.

SCREENCAST: Refracción

A

B

A

B

A

B

F I G U R A 2 8 . 1 6

F I G U R A 2 8 . 1 7

F I G U R A 2 8 . 1 8

Un prisma.

Un "prisma curvo".

Una lente convergente.

Es interesante observar que un "prisma adecuadamente curvo" ofrecerá muchas trayectorias que tardan el mismo tiempo desde un punto A en un lado hasta un punto B en el lado opuesto (Figura 28.17). La curva reduce el grosor del vidrio de manera correcta para compensar las distancias adicionales que recorre la luz en puntos más altos sobre la superficie. Para las posiciones adecuadas de A y B, y para la curva adecuada sobre las superficies de este prisma modificado, todas las trayectorias de la luz tardan exactamente el mismo tiempo. En este caso, toda la luz proveniente de A que incide sobre la superficie de vidrio se enfoca sobre el punto B. Se ve que esta forma es simplemente la mitad superior de una lente convergente (Figura 28.18, que se trata con más detal e después en este capítulo).

Siempre que se observa un atardecer, se ve al Sol durante varios minutos después de que éste se hundió en el horizonte. La atmósfera de la Tierra es delgada en la parte superior y densa en la inferior. Dado que la luz viaja más rápido en aire delgado que en aire denso, la luz del Sol puede llegar a ti más rápidamente si, en lugar de viajar en línea recta, evita el aire más denso y toma una trayectoria más alta y más larga para penetrar la atmósfera en un ángulo más inclinado (Figura 28.19). Puesto que la densidad de la atmósfera cambia de Hacia posición aparente del Sol

Trayectoria de luz real

Hacia posición verdadera del Sol

Tierra

F I G U R A 2 8 . 1 9

Debido a la refracción atmosférica,

cuando el Sol está cerca del horizonte,

parece estar más alto en el cielo.

manera gradual, la trayectoria de la luz se dobla gradualmente para producir una trayectoria curva. Es interesante que esta trayectoria del tiempo mínimo te brinde un periodo de luz solar un poco más largo que aquel a en la que la luz viaja sin doblarse. Más aún: cuando el Sol (o la Luna) está cerca del horizonte, los rayos provenientes del borde inferior se doblan más que los rayos provenientes del borde superior. Esto produce un acortamiento del diámetro vertical, lo que hace que el Sol parezca tener forma de calabaza (Figura 28.20).

P U N T O D E C O N T R O L

Supón que el salvavidas del ejemplo anterior fuera una foca en lugar de un ser humano. ¿Cómo diferiría esta trayectoria de tiempo mínimo de A a B?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

A

La foca puede nadar más rápido de lo que puede correr, y su tra-

Arena

F I G U R A 2 8 . 2 0

yectoria se doblaría como se muestra. Lo mismo ocurre con la luz

Agua

La forma del Sol está distorsionada

que sale de la parte inferior de un trozo de vidrio hacia el aire.

B

por la refracción diferencial.

Índice de refracción

La luz frena cuando entra en un medio transparente. La cantidad en la que difiere la rapidez de la luz de su rapidez en el vacío está dada por el índice de refracción, n, del material: n

rapidez de la luz en el vacío

= rapidez de la luz en el material

Por ejemplo, la rapidez de la luz en un diamante es 124,000 km/s, de modo que el índice de refracción para el diamante es

n 300,000 km/s

=

= 2 . 42

124,000 km/s

Para el vacío, n 1.

Para el vidrio crown óptico, común en las gafas, n es 1.52, lo cual significa que la luz frena de la rapidez c en el aire a la rapidez c/ n c/1.52 0.66 c. Cuanto mayor sea n, mayor será el doblamiento de la luz en la lente, lo que se traduce en menor grosor de la lente.

El valor de n de lentes plásticos de índice alto alcanza 1.76, de modo que la luz frena más y se dobla más, y las lentes pueden hacerse más delgadas —buenas noticias para quienes padecen miopía y quieren gafas más delgadas—. Y ¿qué hay de la rapidez de la luz cuando sale de una lente? Correcto: regresa a casi c, la rapidez habitual de la luz en el aire.

La ley de refracción cuantitativa, denominada ley de Snell, se acredita a W. Snell, un astrónomo y matemático danés del siglo XVII:

u1

n sen u n sen u

n

1

1

2

2

1

donde n y n son los índices de refracción de los medios en cualquier lado de la superfi-n 2

1

2

cie y u y u son los ángulos de incidencia y refracción respectivos. Si se conocen tres de 1

2

u2

estos valores, el cuarto puede calcularse a partir de esta relación. Tal vez en la parte de laboratorio de tu clase apliques la ley de Snell.

F I G U R A 2 8 . 2 1

La refracción se relaciona con los índi-

Espejismos

ces de refracción en concordancia con

la ley de Snell.

Todo mundo está familiarizado con los espejismos que a veces se observan cuando conduces por un camino caliente. El camino distante parece estar húmedo, pero cuando llegas ahí, el camino está seco. ¿Por qué es esto? El aire es muy caliente justo encima de la superficie de la carretera y más frío arriba. La luz viaja más rápido

a través del delgado aire caliente que a través del aire frío superior, que es más denso. De modo que la luz, en lugar de llegar del cielo en líneas rectas, también tiene trayectorias de tiempo mínimo mediante las cuales se curva por un momento hacia la región más caliente cerca del

F I G U R A 2 8 . 2 2

Luz del cielo

La luz proveniente del cielo adquiere

rapidez en el aire cerca del suelo porque

el aire es más caliente y menos denso

que el aire superior. Cuando la luz roza

la superficie y se dobla hacia arriba, el

observador ve un espejismo.

Carretera caliente

camino antes de llegar a tus ojos (Figura 28.22). Donde ves "humedad", en realidad ves el cielo. Un espejismo no es, como muchas personas creen erróneamente, un "truco de la mente". Un espejismo se forma por luz real y puede fotografiarse, como se muestra en la Figura 28.23.

Cuando observas un objeto sobre una estufa caliente o sobre pavimento caliente, ves un efecto ondulatorio reluciente. Esto se debe a las varias trayectorias de tiempo mínimo de la luz conforme pasa a través de varias temperaturas y, por tanto, de densidades variables del aire. El centelleo de las estrellas resulta de fenómenos similares en el cielo, donde la luz atraviesa capas inestables en la atmósfera.

En los ejemplos anteriores, ¿cómo es que la luz aparentemente "sabe" qué condiciones existen y qué compensaciones necesita una trayectoria de tiempo mínimo? Cuando se aproxima a una ventana de vidrio, un prisma o una lente en un ángulo, ¿cómo es que la luz sabe viajar un poco más lejos en el aire para ahorrar tiempo y tomar una trayectoria más corta a través del vidrio? ¿Cómo es que la luz del Sol sabe viajar sobre la atmósfera una distancia adicional antes de tomar un atajo a través del aire más denso y ahorrar tiempo? ¿Cómo es que la luz del cielo sabe que puede llegar a ti en un tiempo mínimo si se zambul e hacia un F I G U R A 2 8 . 2 3

camino caliente antes de inclinarse hacia arriba y llegar a tus ojos? El principio del tiempo Un espejismo. La aparente humedad de mínimo parece no ser la causa de que la luz tenga una mente propia y pueda "percibir" todas la carretera no es la reflexión del cielo las

trayectorias posibles, calcular el tiempo de cada una y elegir la que necesite el tiempo mí- por el agua sino, más bien, refracción nimo. ¿Es así? Por intrigante que parezca, existe una explicación más simple que no le asigna de la luz del cielo que atraviesa el aire esta capacidad previsora a la luz: la refracción simplemente es una consecuencia de que la luz más caliente y menos denso cerca de la tenga diferentes rapideces promedio en distintos medios.

superficie del camino.

PUNTO DE CONTROL

Si la rapidez de la luz fuera la misma en aire de varias temperaturas y densidades,

¿todavía habría periodos de luz solar un poco más largos, centelleo de las estrellas en la noche, espejismos y soles ligeramente aplanados en los atardeceres?

VIDEO: Modelo de refracción

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

No, porque entonces no ocurriría refracción.

28.4 La causa de la refracción

La refracción ocurre cuando la rapidez promedio de la luz cambia al ir de un medio transparente a otro. Para entender esto, piensa en la acción de un par de ruedas de un carro de juguete que están unidas a un eje conforme las ruedas giran con suavidad colina abajo desde Vista

una acera lisa hacia un jardín con césped. Si las ruedas encuentran el césped con un cierto superior

ángulo, como muestra la Figura 28.24, éstas se desvían de su curso en línea recta. Observa de la acera

que la rueda izquierda frena primero cuando interactúa con el césped. La rueda derecha con Césped

mayor rapidez sobre la acera pivotea entonces en torno a la rueda izquierda, que tiene un movimiento más lento. La dirección de las ruedas se dobla hacia la normal (la línea discontinua negra que es perpendicular al lindero entre el césped y la acera en la Figura

28.24).

Una onda de luz se dobla en forma similar, como se muestra en la Figura 28.25. Observa la dirección de la luz, indicada por la flecha azul (el rayo de luz) y también observa F I G U R A 2 8 . 2 4

los frentes de onda (rojo) dibujados en ángulos rectos con respecto al rayo. (Recuerda que La dirección de las ruedas cambia un frente de onda es una cresta, un valle o cualquier porción continua de una onda.) En cuando una rueda frena antes que la figura la onda encuentra la superficie del agua con un ángulo. Esto significa que la la otra.

LU Z

Rayo

porción izquierda de la onda frena en el agua en tanto que el resto en el aire viaja con rapidez c. El rayo de luz permanece perpendicular al frente de onda y, por tanto, se dobla en la superficie. Se dobla al igual que las ruedas se doblan cuando se mueven de la acera al césped. En ambos casos, el doblado es una consecuencia de un cambio en la rapidez.

Frente de onda

La rapidez cambiante de la luz ofrece una explicación de onda acerca de los espejis-Aire

mos. En la Figura 28.26 se observan muestras de frentes de onda provenientes de la copa de un árbol en un día caluroso. Si la temperatura del aire fuese uniforme, la rapidez pro-Agua

medio de la luz sería la misma en todas partes del aire; la luz que viaja al suelo encontraría el suelo. Pero el aire es más caliente y menos denso cerca del suelo, y los frentes de onda ganan rapidez en su viaje hacia abajo, lo que los hace doblarse hacia arriba. De modo que, cuando el observador mira hacia abajo, ve la copa del árbol; esto es un espejismo.

F I G U R A 2 8 . 2 5

La dirección de las ondas de luz cambia

cuando una parte de cada onda frena

F I G U R A 2 8 . 2 6

antes que la otra parte.

Una explicación de onda de un

espejismo. Los frentes de onda

de luz viajan más rápido en aire

caliente cerca del suelo y se doblan

hacia arriba.

Normal

La refracción explica muchas ilusiones. Una común es la de la vara que parece estar doblada cuando se sumerge en forma parcial en el agua. La parte sumergida parece más cerca de la superficie de lo que está en realidad. Lo mismo ocurre cuando ves un pez en el agua; el pez parece próximo a la superficie y aparenta estar más cerca de la posición que realmente tiene (Figura 28.28). Si miras recto hacia abajo en el agua, un objeto sumergido 4 m bajo la superficie parecerá estar a sólo 3 m de profundidad. Debido a la refracción, los objetos sumergidos parecen estar más cerca, de modo que parecen más grandes.

Espejo

F I G U R A 2 8 . 2 7

Cuando la luz frena al pasar de un

Aire

medio a otro, como cuando viaja del

aire al agua, se refracta hacia la normal.

Cuando gana rapidez al viajar de un

F I G U R A 2 8 . 2 8

medio a otro, como cuando va del agua

Debido a la refracción, un objeto

al aire, se refracta lejos de la normal.

sumergido parece estar más cerca de la

superficie de lo que está en realidad.

Como ves, puedes interpretar el doblado de la luz en la superficie del agua al menos de dos formas. Puedes decir que la luz que sale del pez y llega al ojo del observador lo hace en el tiempo mínimo porque toma una trayectoria más corta hacia arriba, hacia la superficie del agua, y una trayectoria correspondientemente más larga a través del aire.

Visto de esta manera, el tiempo mínimo dicta la trayectoria tomada. O puedes decir que las ondas de luz dirigidas hacia arriba en un ángulo hacia la superficie se curvan y se tuercen conforme ganan rapidez cuando salen al aire para llegar al ojo del observador. Visto de este modo, el cambio de rapidez del agua al aire dicta la trayectoria tomada, y esta trayectoria resultó ser una trayectoria de tiempo mínimo. Cualquiera que sea el modo de verlo, los resultados son los mismos.

P U N T O D E C O N T R O L

Si la rapidez de la luz fuera la misma en todos los medios, ¿de cualquier manera habría refracción cuando la luz pasara de un medio a otro?

F I G U R A 2 8 . 2 9

Debido a la refracción, el tarro lleno

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

de cerveza de raíz parece contener más

No.

cerveza de la que en realidad tiene.

C A PÍ T U LO 28 R EFL E X I Ó N Y R EFR ACCI Ó N

529

28.5 La dispersión y los arcoíris

Se sabe que la rapidez promedio de la luz es menor que c en un medio transparente; cuánto disminuye depende de la naturaleza del medio y de la frecuencia de la luz. La rapidez de la SCREENCAST: Arcoíris

luz en un medio transparente depende de su frecuencia. Recuerda del Capítulo 26 que la luz con frecuencias que coinciden con la frecuencia natural o resonante de los oscilado-res electrónicos en los átomos y moléculas del medio transparente se absorbe, y la luz con frecuencias cercanas a la frecuencia resonante no se absorbe sino que interactúa más en la secuencia absorción-emisión que la luz con frecuencias más bajas. Como la frecuencia natural o resonante de la mayor parte de los materiales transparentes está en la región ultravioleta del espectro, la luz con frecuencia más alta viaja de un modo más lento que la luz con frecuencia más baja. La luz violeta viaja cerca de 1% más lento en vidrio ordinario que la luz roja. Las ondas de luz con colores entre el rojo y el violeta viajan a sus propias rapideces intermedias.

Rojo

Dado que la luz con diferentes frecuencias viaja con distintas rapideces en materiales transparentes, se refracta en diferentes cantidades. Cuando la luz blanca se refracta Blanco

dos veces, como en un prisma, la separación de los diferentes colores de luz es bastante Azul

notoria. Esta separación de la luz en colores ordenados de acuerdo con la frecuencia se llama dispersión (Figura 28.30). Esto fue lo que permitió a Isaac Newton formar un espectro cuando sostuvo un prisma de vidrio en la luz solar.

F I G U R A 2 8 . 3 0

Uno de los ejemplos más espectaculares de la dispersión es el arcoíris. Para que un arcoí- La dispersión con un prisma hace visibles los componentes de la luz blanca.

ris se vea, el Sol debe bril ar en una parte del cielo y las gotas de agua de una nube o de la l uvia que cae deben estar presentes en la parte opuesta del cielo. Cuando le das la espalda al Sol, ves el espectro de colores en un arco. Visto desde un avión cerca del mediodía, el arco forma un círculo completo (con la sombra de un avión de vuelo bajo vista en el centro). Todos los arcoíris serían completamente redondos si el suelo no se interpusiera en su camino.

Luz solar

Los hermosos colores de los arcoíris se dispersan de la luz solar mediante millones de pequeñas gotas de agua esféricas que actúan como prismas. Puedes entender mejor esto 42°

si piensas en una sola gota de lluvia, como se muestra en la Figura 28.31. Sigue el rayo 40°

de luz solar a medida que entra en la gota cerca de su superficie superior. Parte de la luz se refleja aquí (no se muestra) y el resto se refracta en el agua. En esta primera refracción, la luz se dispersa en sus colores espectrales; el violeta es el que más se desvía y el rojo es Violeta

el que menos se desvía. Al llegar al otro lado de la gota, cada color se refracta en parte hacia afuera, hacia el aire (no se muestra), y en parte se refleja de vuelta a la gota. Cuando Rojo

llega a la superficie inferior de la gota, cada color se refleja de nuevo (no se muestra) y se F I G U R A 2 8 . 3 1

refracta al aire. Esta segunda refracción es similar a la de un prisma, donde la refracción Dispersión de la luz solar por una sola

en la segunda superficie aumenta la dispersión ya producida en la primera superficie.

gota de lluvia.

En realidad, pueden haber dos refracciones y una reflexión en el ángulo entre los rayos entrante y saliente, que puede ser algo entre 08 y 428 (08 corresponde a una inversión completa de 1808 de la luz). Sin embargo, cerca del ángulo máximo de 428 existe una fuerte concentración de intensidad de luz. Esto es lo que se muestra en la Figura 28.31.

Si bien cada gota dispersa todo un espectro de colores, el observador está en posición de ver la luz concentrada solamente de un solo color de cualquier gota individual (Figura 28.32). Si la luz violeta proveniente de una sola gota llega al ojo del observador, la luz roja proveniente de la misma gota incide en alguna otra parte por debajo de los ojos. Para ver luz roja, uno debe mirar hacia una gota más alta en el cielo. El color rojo se verá cuando el ángulo entre un haz de luz solar y la luz enviada de vuelta por la gota sea de 428. El color violeta se ve cuando el ángulo entre los haces solares y la luz desviada es de 408.

Luz solar

F I G U R A 2 8 . 3 2

40°

Gotas

La luz solar incidente sobre dos gotas de

de agua

lluvia de muestra, como se ilustra, sale

Violeta

de ellas como luz dispersada. El observa-

42°

Rojo

Violeta

dor ve la luz roja desde la gota superior

y la luz violeta desde la gota inferior.

Millones de gotas producen todo el

Rojo

espectro de luz visible.

¿Por qué la luz dispersada por las gotas de lluvia forma un arco? Para responder esto hay que apoyarse en un poco de razonamiento geométrico. Antes que nada, un arcoíris no es el arco bidimensional plano que parece ser. Se ve plano por la misma razón por la que una explosión esférica de fuegos artificiales en el cielo parece un disco: por la ausencia de VIDEO: El arcoíris

señales de distancia. El arcoíris que ves en realidad es un cono tridimensional con la punta (ápice) en tu ojo (Figura 28.33). Piensa en un cono de vidrio, la forma de los conos de papel que en ocasiones ves en los bebederos. Si sostuvieras la punta de tal cono de vidrio contra tu ojo, ¿qué verías? Verías el vidrio como un círculo. Lo mismo sucede con un arcoíris. Todas las gotas que dispersan la luz del arcoíris hacia ti se encuentran en la forma de un cono, un cono de diferentes capas con gotas que dispersan el rojo hacia tu ojo en el exterior, el anaranjado abajo del rojo, el amaril o abajo del anaranjado y así sucesivamente hasta el violeta en la superficie cónica interior. Mientras más gruesa sea la región que contenga las gotas de agua, más grueso será el borde cónico a través del cual

mires, y más vívido será el arcoíris.

F I G U R A 2 8 . 3 3

Cuando tu ojo se ubica entre el Sol (no mostrado, afuera hacia la izquierda) y una región con gotas de agua, el arcoíris que ves es el borde de un cono tridimensional que se extiende por la región con gotas de agua. (Innumerables capas de gotas forman innumerables arcos bidimensionales como los cuatro aquí sugeridos.)

Para entender esto todavía mejor, considera sólo la desviación de la luz roja. Ves el rojo cuando el ángulo entre los rayos incidentes de luz solar y los rayos dispersados es de 428. Desde luego, los haces se dispersan 428 de las gotas en todas direcciones por todo el cielo: arriba, abajo y a los lados. Pero la única luz roja que tú ves es la proveniente de las gotas que se encuentran en un cono con un ángulo de 428 entre lado y eje. Tu ojo está en el ápice de este cono, como se muestra en la Figura 28.34. Para ver violeta, miras 408

respecto del eje cónico (de modo que el grosor del vidrio del cono del párrafo anterior está ahusado —muy delgado en la punta y más grueso a mayor distancia de la punta—).

F I G U R A 2 8 . 3 4

Tu cono de visión que interseca la nube de gotas que crea tu arcoíris es diferente del Sólo las gotas de lluvia a lo largo de la

de la persona que está junto a ti. De modo que cuando algún amigo te diga "mira qué línea discontinua dispersan la luz roja

hermoso arcoíris", tú puedes replicar: "muy bien; hazte a un lado para que pueda verlo".

hacia el observador a un ángulo de 428;

por tanto, la luz forma un arco.

Todo mundo ve su propio arcoíris personal.

Otro hecho acerca de los arcoíris: un arcoíris siempre da hacia ti de frente debido a la falta de señales de distancia mencionada líneas arriba. Cuando te mueves, tu arcoíris se mueve contigo. De modo que nunca te puedes acercar al lado de un arcoíris, o verlo casi desde su final como en la visión exagerada de la Figura 28.33. No puedes llegar a su fin. Por tanto, la expresión "buscar la olla de oro al final del arcoíris" significa buscar algo que nunca podrás alcanzar.

Con frecuencia puedes ver un arco secundario más grande, con colores invertidos, que se arquea en un ángulo más grande alrededor del arco primario. No se abordará este arco secundario, excepto para decir que se forma por circunstancias similares y es resultado de una doble reflexión dentro de las gotas de lluvia (Figura 28.36). Debido a esta reflexión adicional (y a la pérdida de refracción adicional), el arco secundario es mucho más tenue y sus colores están invertidos.

C A PÍ T U LO 28 R EFL E X I Ó N Y R EFR ACCI Ó N

531

F I G U R A 2 8 . 3 5

Dos refracciones y una reflexión en las

gotas de agua producen luz en todos los

ángulos hasta aproximadamente 428,

con la intensidad concentrada donde se

ve el arcoíris de 40 a 428. No sale luz de

Luz solar

la gota de agua a ángulos mayores que

428, a menos que experimente dos o más

reflexiones dentro de la gota. De modo

que el cielo es más brillante dentro del

Rojo

arcoíris que afuera de él. Observa el

débil arcoíris secundario a la derecha del

primario.

Violeta

F I G U R A 2 8 . 3 6

Una doble reflexión en una gota produ-

ce un arco secundario.

P U N T O D E C O N T R O L

1. Si apuntas a una pared con el brazo extendido para formar un ángulo aproximado de 42º con la normal a la pared y luego giras el brazo en un círculo completo al tiempo que mantienes el mismo ángulo, ¿qué forma describe tu brazo? ¿Qué forma recorre tu dedo sobre la pared?

2. Si la luz viajara con la misma rapidez en las gotas de lluvia que en el aire, ¿todavía habría arcoíris?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. Tu brazo describe un cono y tu dedo recorre un círculo; lo mismo sucede con un arcoíris.

2. No.

28.6 Reflexión total interna

Alguna noche de sábado cuando tomes un baño, llena la tina con mucha agua y su-mérgete junto con una linterna a prueba de agua. Apaga la luz del baño. Con la luz sumergida, alumbra en línea recta hacia arriba y luego inclínala en forma lenta aleján-dola de la superficie. Observa cómo la intensidad del haz saliente disminuye y cuánta más luz se refleja de la superficie del agua hacia el fondo de la tina. A un determinado ángulo, llamado ángulo crítico, observarás que el haz ya no sale al aire sobre la superficie. La intensidad del haz saliente se reduce a cero en el lugar en el que tiende a rozar la superficie. El ángulo crítico es el ángulo mínimo de incidencia en el interior de un medio en el que un rayo de luz se refleja en su totalidad. Cuando la linterna se inclina más F I G U R A 2 8 . 3 7

La luz emitida en el agua se refracta

parcialmente y se refleja parcialmente

en la superficie. Las líneas discontinuas

azules muestran la dirección de la luz y

las longitudes de las flechas indican las

Ángulo

proporciones refractada y reflejada. Más

crítico

allá del ángulo crítico, el haz se refleja

de manera interna en su totalidad.

allá del ángulo crítico (488 con respecto a la normal para el agua),

observarás que toda la luz se refleja de vuelta a la tina. Esto es reflexión total interna. La luz que golpea la superficie entre el aire y el agua obedece la ley de reflexión: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. La única luz que sale de la superficie del agua es la luz que se refleja de manera difusa desde el fondo de la tina. Este procedimiento se muestra en la Figura 28.37. Las proporciones de luz refractada y de luz reflejada internamente se indican con las longitudes relativas de las flechas.

La reflexión total interna ocurre en los materiales en los cuales la rapidez de la luz es menor que la rapidez de la luz exterior. La rapidez de la luz es menor en agua que en aire, de modo que todos los rayos de luz en el agua que llegan a la superficie con un ángulo de incidencia mayor a 488 se reflejan de vuelta hacia el agua. Así que cuando tu 96°

pez dorado en su pecera mira hacia arriba, lo que ve es una vista reflejada de los lados y el fondo de la pecera. Directamente arriba, ve una vista comprimida del mundo exterior (Figura 28.38). La vista exterior de 1808 de horizonte a horizonte opuesto se ve a través de un ángulo de 968: el doble del ángulo crítico. Hay una lente que comprime de manera similar una visión ancha, denominada lente ojo de pescado, que se utiliza para F I G U R A 2 8 . 3 8

fotografía con efecto especial.

Un observador submarino ve un

La reflexión total interna ocurre en vidrio rodeado de aire porque la rapidez de la círculo de luz en la superficie quieta.

luz en el vidrio es menor que en el aire. El ángulo crítico para el vidrio es de más o Más allá de un cono de 968 (el doble

menos 438, según el tipo de vidrio. De modo que la luz en el vidrio que incide con del ángulo crítico), un observador ve un

reflejo del agua interior o del fondo.

ángulos mayores a 438 respecto de la superficie se refleja por completo internamente. Ninguna luz escapa más allá de este ángulo; más bien, toda se refleja de vuelta al vidrio, incluso cuando la superficie exterior está estropeada por suciedad o polvo, de ahí la utilidad de los prismas de vidrio (Figura 28.39). Un poco de luz se pierde por reflexión antes de entrar al prisma, pero una vez que la luz está adentro, la reflexión en la cara inclinada a 458 es total:

100%. Por el contrario, los espejos plateados o alumi-nizados reflejan sólo alrededor de 90% de la luz incidente. Por eso se utilizan prismas en lugar de espejos en muchos instrumentos ópticos.

F I G U R A 2 8 . 3 9

Reflexión total interna en un prisma. El

prisma cambia la dirección del haz de

luz (a) en 908, (b) en 1808 y (c) nada en

absoluto. Observa que, en cada caso, la

orientación de la imagen es diferente de

la orientación del objeto.

(a)

(b)

(c)

En la Figura 28.40 se muestra un par de prismas, cada uno de los cuales refleja luz a 1808. Los binoculares utilizan pares de prismas para prolongar la trayectoria de la luz entre las lentes y, por ende, eliminan la necesidad de grandes barriles. De modo que

¿Te gustaría volverte rico? Sé el

un conjunto compacto de binoculares es tan efectivo como un telescopio más largo.

primero en inventar una superfi-

Otra ventaja de los prismas es que, mientras que la imagen en un telescopio recto está cie que refleje 100% de la luz

externa que incide sobre ella.

de cabeza, la reflexión por los prismas en los binoculares revierte la imagen, de modo que las cosas se ven derechas.

F I G U R A 2 8 . 4 0

Reflexión total interna en un par de

prismas, común en los binoculares.

C A PÍ T U LO 28 R EFL E X I Ó N Y R EFR ACCI Ó N

533

El ángulo crítico de un diamante es de unos 24.58, más pequeño que el de cualquier otra sustancia común. El ángulo crítico varía un poco con los colores, porque la rapidez de la luz varía ligeramente con los diferentes colores. Una vez que la luz entra en un diamante, la mayor parte incide sobre los lados inclinados con ángulos mayores que 24.5º

y se refleja internamente en su totalidad (Figura 28.41). Debido a la gran reducción de rapidez cuando la luz entra en el diamante, la refracción es pronunciada y, ya que la frecuencia depende de la rapidez, existe una gran dispersión. Hay mayor dispersión cuando la luz sale a través de las muchas facetas en su superficie. En consecuencia, se ven destellos inesperados de una amplia gama de colores. Es interesante que cuando estos destellos son tan angostos que sólo pueden verse con un ojo a la vez, el diamante "destella".

F I G U R A 2 8 . 4 1

Trayectorias de luz en un diamante. Los

Luz blanca Violeta

Rojo

rayos que golpean la superficie interior

Menos que 24.58, de modo

con ángulos mayores que el ángulo

que toda la luz se refracta

crítico se reflejan internamente y salen

mediante refracción en la superficie

superior.

Más que 24.58, de modo

que toda la luz se refleja internamente

La reflexión total interna también sirve de base para el funcionamiento de las fibras ópticas o tuberías de luz (Figura 28.42). Una fibra óptica "canaliza" la luz de un lugar a otro mediante una serie de reflexiones totales internas, de forma muy parecida a como una bala rebota en una tubería de acero. Los rayos de luz rebotan a lo largo de las paredes interiores y siguen los giros y vueltas de la fibra.

Los haces de fibras ópticas permiten ver lo que ocurre en lugares inaccesibles, como el interior de un motor o el estómago de un paciente. Las fibras pueden fabricarse tan pequeñas que puedan serpentear por los vasos sanguíneos o por los conductos estrechos del cuerpo, como la uretra. La luz alumbra por algunas de las fibras para iluminar la escena y se refleja de vuelta a lo largo de otras.

Los cables de fibra óptica también son importantes en las comunicaciones porque ofrecen una alternativa práctica a los alambres y los cables de cobre.

Delgadas fibras de vidrio ahora sustituyen a los gruesos, voluminosos y cos-F I G U R A 2 8 . 4 2

tosos cables de cobre para transportar miles de mensajes telefónicos simultáneos entre La luz se "canaliza" desde abajo median-los grandes centros de conmutación y a través del lecho marino. Por medio de las fibras te una sucesión de reflexiones totales ópticas, las señales de control se alimentan en las aeronaves desde el piloto hasta las internas hasta que sale en los extremos superficies de control. Las señales se transportan en las modulaciones de luz láser. A dife- superiores.

rencia de la electricidad, la luz es indiferente a la temperatura y a las fluctuaciones en los campos magnéticos circundantes y, por tanto, la señal es más clara. Además, es mucho menos probable que sean intervenidas por espías.

28.7 Lentes

Un caso muy práctico de refracción ocurre en las lentes. Para entender una lente puedes analizar las trayectorias que tardan el mismo tiempo, como se hizo antes, o puedes suponer Aprender sobre lentes es una acti-que una lente consiste en varios prismas y bloques de vidrio coincidentes distribuidos en vidad práctica. No jugar con

lentes

el orden que se muestra en la Figura 28.43. Los prismas y los bloques refractan los rayos mientras las estudias es como

aprender a nadar lejos del agua.

de luz paralelos entrantes de modo que convergen hacia (o divergen desde) un punto. El arreglo que se muestra en la Figura 28.43a hace converger la luz, y a tal lente se le llama lente convergente. Observa que es más gruesa en el medio y más delgada en los bordes.

F I G U R A 2 8 . 4 3

Puede considerarse que una lente es

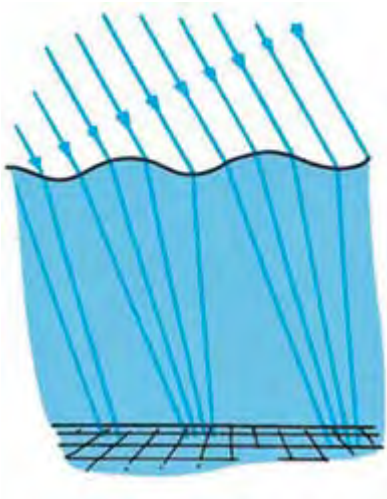
como un conjunto de bloques y prismas:

(a) una lente convergente y (b) una lente

(a)

(b)

divergente.



El arreglo de la Figura 28.43b es diferente. La parte media es más delgada que los bordes, y hace divergir la luz; a tal lente se le llama lente divergente. Observa que los prismas divergen los rayos incidentes de un modo tal que parece que provienen de un solo punto enfrente de la lente. En ambos lentes, la mayor desviación de los rayos ocurre en los prismas más externos, porque tienen el ángulo más grande entre las dos superficies que refractan. No ocurre desviación exactamente a la mitad, porque en dicha región las caras del vidrio son paralelas entre sí. Desde luego, las lentes reales no están hechas de prismas, como se indica en la Figura 28.43; están hechas de un pedazo sólido de vidrio con una superficie a la que usualmente se le da la forma de una curva esférica.

En la Figura 28.44 se observa cómo las lentes lisas refractan ondas.

F I G U R A 2 8 . 4 4

Los frentes de onda viajan con más lenti-

tud en el vidrio que en el aire. (a) Las

ondas se retrasan más cuando atraviesan

el centro de la lente y resulta una conver-

gencia. (b) Las ondas se retrasan más en

(a)

(b)

los bordes y resulta una divergencia.

En la Figura 28.45 se muestran algunas características fundamentales de la descripción de una lente convergente. El eje principal de una lente es la línea que une los centros de curvatura de sus superficies. El punto focal (o foco) es el punto donde converge un haz de luz paralelo al eje principal. Los haces paralelos incidentes que no son paralelos al eje principal se enfocan en puntos arriba o abajo del punto focal. Todos esos puntos posibles constituyen un plano focal. Una lente tiene dos puntos focales y dos planos focales. Cuando la lente de una cámara se monta para objetos distantes, la superficie fotosensible está muy próxima al plano focal detrás de la lente de la cámara.

La longitud focal de la lente es la distancia entre el centro de la lente y cualquier punto focal.

F I G U R A 2 8 . 4 5

Características fundamentales de una

Centro de

Centro de

lente convergente.

curvatura

Longitud focal

Longitud focal

curvatura

Punto

Punto

focal

focal

Eje principal

F I G U R A 2 8 . 4 6

Los patrones movedizos de las áreas brillantes y oscuras del fondo de la alberca son resultado de la superficie dispareja del agua, que se comporta como una frazada de lentes ondulantes. Así como ves el fondo de la alberca reluciente, un pez que mirara al Sol lo vería reluciente también. Debido a irregularidades similares en la atmósfera, ves centellear a las estrellas.

Formación de imágenes por una lente

En este momento, la luz se está reflejando de tu cara a esta página. La luz que se refleja de tu frente, por ejemplo, golpea cada parte de la página. Lo mismo ocurre con la luz que se refleja de tu barbilla. Cada parte de la página se ilumina con la luz reflejada de tu frente, tu nariz, tu barbilla y cualquier otra parte de tu cara. No ves una imagen de tu cara sobre la página porque hay mucho traslape de luz. Pero coloca una barrera, SCREENCAST: Imágenes a través

con una pequeña perforación en ella, entre tu cara y la página, y la luz que llega a la de orificios

página desde tu frente no se traslapa con la luz de tu barbilla. Lo mismo ocurre con el

C A PÍ T U LO 28 R EFL E X I Ó N Y R EFR ACCI Ó N

535

PRACTICANDO LA FÍSICA

Construye una cámara estenopeica. Recorta el tiempos de exposición, a extremo de una caja de cartón pequeña y cúbrelo

partir de unos 3 segun-

con papel de calcar semitransparente o con un

dos. Prueba también con

pañuelo desechable. Haz un agujerito muy bien recortado

cajas de varias longitudes.

en el otro extremo. (Si el cartón es grueso, puedes hacer el

En lugar de ver una

agujerito a través de una hoja de papel de aluminio colo-

vela, como sugiere el

cada sobre una abertura más grande en el cartón.) Dirige

dibujo, apunta tu caja al cielo, hacia el Sol. La imagen solar

la cámara a un objeto brillante en una habitación oscura y

sobre el papel de calcar es clara y brillante. Las imágenes del Sol

verás una imagen de cabeza sobre el papel de calcar. Cuanto

a través del orificio también son evidentes en el suelo debajo

más pequeño sea el orificio, más tenue y definida será la

de un árbol en un día soleado. Cuando las aberturas que se

imagen. Si estás en una habitación oscura, sustituye el papel

forman entre las hojas del árbol son pequeñas comparadas con

de calcar con película fotográfica no revelada, cubre la parte

la altura del árbol, las aberturas se comportan como agujeritos

trasera de modo que sea hermética a la luz y cubre el orificio y proyectan círculos de luz, muchos traslapados, sobre el suelo.

con una tapa removible. Estás listo para tomar una fotogra-

Recuerda las fotografías con las que inician los Capítulos 1

fía. Los tiempos de exposición difieren básicamente con el

y 27 que muestran lo que ocurre al momento de un eclipse

tipo de película y la cantidad de luz. Prueba con diferentes

parcial de Sol.

resto de tu cara. Sin este traslape, se forma una imagen de tu cara sobre la página. Será muy tenue porque muy poca de la luz reflejada de tu cara pasa por el orificio. Para ver la imagen, tendrías que blindar la página de otras fuentes de luz. Lo mismo sucede con el jarrón y las flores de la Figura 28.47b.3

(a)

(b)

(c)

F I G U R A 2 8 . 4 7

Formación de imágenes. (a) No aparece ninguna imagen sobre la pared porque los rayos provenientes de todas partes del objeto se traslapan por toda la pared. (b) Una sola abertura pequeña en una barrera impide que los rayos traslapados lleguen a la pared; se forma una imagen tenue de cabeza. (c) Una lente converge los rayos sobre la pared sin traslaparlos; más luz forma una imagen más brillante.

Las primeras cámaras no tenían lentes y dejaban entrar luz por un pequeño orificio.

Puedes ver por qué la imagen está de cabeza por los rayos de muestra de la Figura 28.47b.

Se necesitaban tiempos de exposición prolongados debido a la pequeña cantidad de luz que entraba por el orificio. Un orificio un poco más grande admitiría más luz, pero los

¿Puedes ver por qué la imagen de

rayos traslapados producirían una imagen borrosa. Un orificio muy grande permitiría la Figura 28.47b está de cabeza? Y,

mucho traslape y ninguna imagen sería perceptible. Aquí es donde entra en acción una

¿es cierto que, cuando tus fotogra-

lente convergente (Figura 28.47c). La lente hace que la luz converja sobre la pantalla sin el fías se procesan e imprimen, todas

traslape indeseable de los rayos. Mientras que las primeras cámaras estenopeicas servían están de cabeza?

sólo para fotografiar objetos en reposo debido al prolongado tiempo de exposición que se necesitaba, los objetos en movimiento pueden fotografiarse con las cámaras de lentes debido al tiempo de exposición corto, razón por la cual las fotografías tomadas con las cámaras con lentes reciben el nombre de instantáneas.

3Una forma cuantitativa de relacionar las distancias del objeto con las distancias de la imagen está dada por la ecuación de las lentes delgadas:

Imagen

Objeto

real

$1 + 1 = 1$

d0 f

o d =

d

i

d −

0

di

f

0

f

donde d es la distancia del objeto a la lente, d es la distancia de la lente a la imagen y f es la distancia focal de o

i

la lente.

PA R T E SEI S

LU Z

El uso más sencillo de una lente convergente es una lupa. Para entender cómo funciona, piensa en cómo examinas los objetos cercanos y lejanos. A simple vista, un objeto lejano se ve a través de un ángulo de visión relativamente estrecho, y un objeto cercano se ve a través de un ángulo de visión más ancho (Figura 28.48). Para ver los detalles de un SCREENCAST: Lentes

objeto pequeño, necesitas acercarte lo más posible para tener el ángulo de visión más ancho. Pero tu ojo no puede enfocar cuando está muy cerca. Ahí es donde entra en acción la lupa. Cuando estás cerca del objeto, la lupa te proporciona una imagen nítida agrandada.

F I G U R A 2 8 . 4 8

Visualización.

El objeto se ve a través de un ángulo estrecho

El objeto se ve a través de un ángulo ancho

Cuando utilizas una lupa, como lo hace Chris Lee en la página 485, la sostienes cerca del objeto que vas a examinar. Esto es así porque una lente convergente ofrece f

una imagen agrandada derecha sólo cuando el objeto está antes del punto focal (Figura 28.49). Si una pantalla se coloca a la distancia en la que se produce la imagen, no aparece una imagen sobre ella porque no se dirige luz hacia el lugar de la imagen. Sin F I G U R A 2 8 . 4 9

embargo, los rayos que llegan a tu ojo se comportan como si provinieran del lugar de la Cuando un objeto está cerca de una

imagen; al resultado se le denomina imagen virtual.

lente convergente (antes de su punto

Cuando el objeto está tan lejos que queda fuera del punto focal de una lente conver-focal f), la lente actúa como una lupa y

gente, se forma una imagen real en lugar de una imagen virtual. La Figura 28.50 mues-produce una imagen virtual. La imagen

tra un caso en el que una lente convergente forma una imagen real sobre una pantalla.

aparece más grande y más alejada de la

Una imagen real está de cabeza. Se utiliza un arreglo similar para proyectar diapositivas lente que el objeto.

y películas sobre una pantalla y para proyectar una imagen real sobre el área fotosensible de una cámara. Las imágenes reales con una sola lente siempre están de cabeza.

Imagen real sobre la pared

F I G U R A 2 8 . 5 0

Cuando un objeto está lejos de una lente

Lente

convergente (fuera de su punto focal), se

forma una imagen real de cabeza.

Objeto sobre mesa

Una lente divergente que se utiliza sola produce una

imagen virtual reducida. No importa lo lejos o cerca que

esté el objeto. Cuando una lente divergente se usa sola, la

imagen siempre es virtual, está derecha y es más pequeña

que el objeto. Con frecuencia se usa una lente divergente

como "buscador" (visor) en una cámara. Cuando obser-

F I G U R A 2 8 . 5 1

vas el objeto que se va a fotografiar a través de dicha len-

Una lente divergente forma una imagen

te, ves una imagen virtual que tiene aproximadamente

virtual derecha de Jamie y su gato.

las mismas proporciones que la fotografía.

C A PÍ T U LO 28 R EFL E X I Ó N Y R EFR ACCI Ó N

537

28.8 Defectos en las lentes

Ninguna lente proporciona una imagen perfecta. La distorsión de la imagen se llama aberración. Cuando se combinan lentes de determinadas maneras, las aberraciones pueden disminuirse al mínimo. Por esta razón, la mayor parte de los instrumentos ópticos utiliza lentes compuestas, y cada una consiste en muchas lentes simples en lugar de una sola lente.

La aberración esférica resulta de la luz que pasa por los bordes de una lente y se enfocan en un lugar un poco diferente de donde se enfoca la luz que pasa cerca del centro de la lente (Figura 28.52). Para remediar esto, se cubren los bordes de la lente, F I G U R A 2 8 . 5 2

Aberración esférica.

como con el diafragma de una cámara. La aberración esférica se corrige en los buenos instrumentos ópticos mediante una combinación de lentes.

F I G U R A 2 8 . 5 3

¿Cómo se afecta la visión cuando la

visión de ambos ojos se desvía a los lados

con prismas? Después de unos minutos,

¡los ojos, el cerebro y los músculos se

adaptan al cambio!

La aberración cromática es resultado de luz de diferentes colores que tienen distintas rapideces y, por tanto, diferentes refracciones en las lentes (Figura 28.54). En una lente simple (como en un prisma), los diferentes colores de la luz no se llegan a enfocar en el mismo lugar. Las lentes acromáticas, que combinan lentes simples de diferentes tipos de vidrio, corrigen este defecto. (Es interesante que Isaac Newton haya sustituido el FIGURA 28.54

objetivo de un telescopio con un espejo parabólico para evitar la aberración cromática.) Aberración cromática.

La pupila del ojo cambia de tamaño para regular la cantidad de luz que entra. La visión es más clara cuando la pupila es más pequeña porque la luz pasa entonces sólo por la parte central del cristalino, donde las aberraciones esférica y cromática son mínimas.

Además, el ojo, entonces, actúa más como una cámara estenopeica, de modo que se necesita menos enfoque para producir una imagen clara. Ves mejor en la luz brillante Ahora hay gafas baratas con lentes

porque en dicha luz tus pupilas son más pequeñas.

llenos de agua. Agregar o quitar

El astigmatismo del ojo es un defecto que resulta cuando la córnea se curva más en el agua entre dos membranas

una dirección que en otra, un poco como el costado de un barril. Debido a este defec-de policarbonato puede corregir

to, el ojo no forma imágenes claras. El remedio son las gafas con lentes cilíndricas que tanto la miopía como la hiper-tienen más curvatura en una dirección que en otra.

metropía. Una bomba pequeña

En la actualidad, una opción para quienes tienen mala vista es usar gafas. La llegada regula la cantidad de agua entre

de las gafas probablemente ocurrió en China y en Italia a finales del siglo XIII. (Es las membranas. El agua puede

producir una lente convexa para

muy curioso que el telescopio no se inventara sino unos 300 años después. Si, mientras la hipermetropía, o menos agua

tanto, alguien veía objetos a través de un par de lentes separadas a lo largo de sus ejes, puede producir una lente cóncava

como lentes fijas en los extremos de un tubo, no hay registro de ello.) Una alternati-para la miopía. Una vez que se

va a las gafas son las lentes de contacto. Una alternativa más es la LASIK (acrónimo optimiza cada lente, el usuario

en inglés para queratomileusis in situ asistida por láser), en la que pulsos de luz láser fija en su lugar la configuración

vuelven a dar forma a la córnea y producen una visión normal. Otro procedimiento, la establecida del agua. La bomba

PRK (acrónimo en inglés para queratectomía fotorrefractiva), corrige los tres defectos y el ensamble de tubos se quitan

y quedan intactos para ajustes

comunes de la vista. IntraLase, lentes de contacto que se implantan, así como procedi-posteriores. Consulta en internet

mientos más novedosos, siguen en desarrollo. Es seguro afirmar que usar gafas y lentes Self-Adjusting Eyeglasses for the

de contacto pronto será cosa del pasado. Realmente vives en un mundo que cambia World's Poor (Gafas autoajustables

con rapidez. Y eso puede ser bueno.

para los pobres del mundo).

538

PA R T E SEI S

LU Z

P U N T O D E C O N T R O L

1. Si la luz viajara con la misma rapidez en el vidrio y en el aire, ¿las lentes Si usas gafas y alguna vez te

de vidrio alterarían la dirección de los rayos de luz?

las has colocado mal, o si se te

dificulta leer letras pequeñas,

2. ¿Por qué existe aberración cromática en la luz que pasa a través de una intenta entrecerrar los ojos o,

lente, pero ninguna en la luz que se refleja de un espejo?

todavía mejor, intenta sostener un

agujerito (en una hoja de papel o

cualquier cosa) enfrente de tu ojo,

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

cerca de la página. Verás la letra

1. No.

pequeña con claridad y, dado que

2. Diferentes frecuencias viajan con distintas rapideces en un medio transparente y, estás cerca de ella, la verás amplifi-por tanto, se refractan con diferentes ángulos, lo que produce aberración cromá-cada. ¡Inténtalo y verás!

tica. Sin embargo, los ángulos a los que se refleja la luz no tienen nada que ver con su frecuencia. Un color se refleja igual que cualquier otro color. Por tanto, en los telescopios, los espejos son preferibles a las lentes, porque no hay aberración cromática.

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)
Reflexión. El regreso de los rayos de luz desde una superficie.

con un medio menos denso a un ángulo más grande que el

Principio del tiempo mínimo de Fermat. La luz toma la

ángulo crítico.

trayectoria que necesita el tiempo mínimo cuando va de un

Lente convergente. Lente que es más gruesa en medio que en

lugar a otro.

los bordes y que refracta rayos paralelos hacia un foco.

Ley de reflexión. El ángulo de reflexión es igual al ángulo de Lente divergente. Lente que es más delgada en medio que en

incidencia.

los bordes, lo que hace que los rayos paralelos diverjan.

Refracción. El doblado de un rayo de luz oblicuo cuando pasa

Imagen virtual. Imagen formada por rayos de luz que no

de un medio transparente a otro.

convergen en el lugar de la imagen.

Ángulo crítico. El ángulo mínimo de incidencia dentro

Imagen real. Imagen formada por rayos de luz que convergen

de un medio al cual un rayo de luz se refleja en su

en el lugar de la imagen. Una imagen real, a diferencia de

totalidad.

una imagen virtual, puede desplegarse sobre una pantal a.

Reflexión total interna. La reflexión total de la luz que viaja
Aberración. Distorsión de una imagen producida por una lente,
dentro de un medio más denso cuando golpea la frontera

que en cierto grado está presente en todos los sistemas ópticos.

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N) 28.1 Reflexión

28.3 Refracción

1. ¿Cómo es que la luz incidente que cae sobre un objeto

8. ¿Cómo se compara el ángulo al que un rayo de luz golpea

afecta el movimiento de los electrones de los átomos del

un panel de una ventana de vidrio, con el ángulo al que

objeto?

la luz sale del otro lado?

2. ¿Qué hacen los electrones afectados por la iluminación

9. ¿Cuándo ocurre que el ángulo al que un rayo de luz

cuando se ponen a vibrar con mayor energía?

golpea un vidrio no es igual que el ángulo al que sale?

3. ¿Qué es el principio del tiempo mínimo de Fermat?

10. ¿En cuál medio la luz viaja más rápido: aire delgado o aire

denso? ¿Cómo afecta esto el periodo de la luz diurna?

28.2 La ley de reflexión

11. ¿La ley de reflexión se sostiene para espejos curvos? Explica.

4. Cita la ley de reflexión.

12. ¿Un espejismo es el resultado de la reflexión o de la

5. En relación con la distancia de un objeto enfrente de

refracción?

un espejo plano, ¿qué tan lejos está la imagen detrás del

espejo?

28.4 La causa de la refracción

6. ¿Qué fracción de la luz que alumbra recto en un pedazo de

13. Cuando la rueda de un carro se mueve desde una acera

vidrio transparente se refleja desde la primera superficie?

lisa hacia un jardín con césped, la interacción de la rueda

7. ¿Una superficie puede considerarse que está pulida para

con las hojas de césped frena la rueda. ¿Qué frena a la luz

algunas ondas y no para otras? Ofrece un ejemplo.

cuando pasa del aire al vidrio o al agua?

C A PÍ T U LO 28 R E V ISI Ó N

539

14. ¿Cuál es el ángulo entre un rayo de luz y su frente de

28.6 Reflexión total interna

onda?

22. ¿Qué se entiende por “ángulo crítico”?

15. ¿Cuál es la relación entre la refracción y la rapidez de la

23. ¿A qué ángulo dentro del vidrio la luz se refleja

luz?

internamente en su totalidad? ¿A qué ángulo dentro de un

16. ¿Las gafas hechas con materiales con "alto índice de

diamante la luz se refleja internamente en su totalidad?

refracción" son delgadas o gruesas?

24. La luz suele viajar en líneas rectas, pero se "dobla" en una

17. ¿La refracción de la luz hace que una alberca parezca más

fibra óptica. Explica.

profunda o menos profunda de lo que en realidad es?

28.7 Lentes

28.5 La dispersión y los arcoíris

25. Distingue entre una lente convergente y una lente divergente.

18. ¿Cuál viaja con más lentitud en vidrio: la luz roja o la luz

26. ¿Qué es la distancia focal de una lente?

violeta?

27. Distingue entre una imagen virtual y una imagen real.

19. ¿Una sola gota de lluvia iluminada por la luz solar desvía

28. ¿Qué tipo de lente puede usarse para producir una

la luz de un solo color o dispersa un espectro de colores?

imagen real? ¿Una imagen virtual?

20. ¿Un observador ve un solo color o un espectro de colores

provenientes de una sola gota lejana?

28.8 Defectos en las lentes

21. ¿Por qué un arcoíris secundario es más tenue que un

29. ¿Por qué la visión es más clara cuando las pupilas del ojo

arcoíris primario?

están muy pequeñas?

30. ¿Qué es el astigmatismo y cómo puede corregirse?

P I E N S A Y R E A L I Z A (A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 31. Envía un mensaje a la abuela y convéncela de que, para

veas tu cara. Gira otra vez los espejos y observa si tu

ver su imagen completa en el espejo, el espejo sólo debe

imagen gira también. ¿Sorprendente?

tener la mitad de su altura. Discute también el intrigante

papel de la distancia en un espejo que tenga la mitad

de tamaño. Tal vez sea útil hacer dibujos sencillos que

acompañen tus explicaciones.

90°

60°

32. Puedes producir un espectro si colocas una bandeja de

agua en la luz solar brillante. Inclina un espejo de bolsillo

35. Determina el poder amplificador de una lente al enfocar

contra el borde interior de la bandeja y ajústalo hasta

sobre las líneas de una hoja de papel rayada. Cuenta los

que aparezca el espectro en la pared o el techo. ¡Ajá!

espacios entre las líneas que caben en un espacio amplificado

Produjiste un espectro sin un prisma.

y tendrás el poder amplificador de la lente. Puedes hacer lo

mismo con los binoculares y una pared de ladril o distante.

Sostén los binoculares de modo que sólo un ojo mire

los ladril os a través del ocular mientras el otro ojo mira

directamente los ladril os. El número de ladril os vistos con

el ojo sin ayuda que caben en un ladril o amplificado te

proporciona la amplificación del instrumento.

33. Coloca dos espejos de bolsillo en ángulo recto y pon

una moneda entre ellos. Verás cuatro monedas. Cambia

Espacio

el ángulo de los espejos y observa cuántas imágenes de

amplificado

la moneda puedes ver. Con los espejos en ángulo recto,

mira tu cara. Luego parpadea. ¿Ves algo extraño? Sostén

una página impresa contra los espejos dobles y compara

su apariencia con la reflexión de un solo espejo.

3 espacios caben en

Ojo

un espacio amplificado

izquierdo

Ojo

derecho

36. Perfora un orificio en una hoja de papel, sostenla en la luz

solar de modo que la imagen solar sea del mismo tamaño

34. Obsérvate en un par de espejos colocados en ángulo

que una moneda en el suelo y luego determina cuántas

recto. Te ves como los demás te ven. Gira los espejos,

monedas cabrían entre el suelo y el orificio. Éste es el mismo

todavía en ángulo recto. ¿Tu imagen también gira? Ahora

número de diámetros solares que cabrían en la distancia de

coloca los espejos separados 608 de modo que de nuevo

la Tierra al Sol. (¿Recuerdas este ejercicio del Capítulo 1?)

P I E N S A Y R E S U E L V E (A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 37. Supón que caminas hacia un espejo a 2 m/s. ¿Qué tan rápido se aproximan mutuamente tú y tu imagen? (La respuesta no es 2 m/s.)

38. Demuestra con un diagrama simple que, cuando un espejo con un haz fijo incidente sobre él gira un determinado ángulo, el haz reflejado gira un ángulo el doble de grande. (Esta

41. Ningún vidrio es perfectamente transparente. Sobre todo debido a las reflexiones, alrededor de 92% de la luz pasa a través de una hoja de vidrio transparente de una ventana. La pérdida de 8% no se aprecia a través de una sola hoja, pero a través de varias hojas la pérdida es evidente.

¿Cuánta luz se transmite por una ventana doble (una con

duplicación del desplazamiento hace que sean más evidentes

dos hojas de vidrio)?

las irregularidades en el vidrio de una ventana ordinaria.)

42. El diámetro del Sol forma un ángulo de 0.538 con

39. Una mariposa a nivel del ojo está 20 cm enfrente de un

la Tierra. ¿Cuántos minutos tarda el Sol en moverse

espejo plano. Tú estás detrás de la mariposa, a 50 cm del

1 diámetro solar en un cielo directamente sobre tu

espejo. ¿Cuál es la distancia entre tu ojo y la imagen de la

cabeza? (Recuerda que transcurren 24 horas, o 1,440

mariposa en el espejo?

minutos, para que el Sol se mueva a través de 3608.)

40. Cuando luz golpea un vidrio en sentido perpendicular, en

¿Cómo se compara tu respuesta con el tiempo que tarda

cada superficie se refleja alrededor de 4%. Demuestra que

el Sol en desaparecer, una vez que su borde inferior

92% de la luz se transmite a través de un panel de vidrio

toca el horizonte al atardecer? (¿La refracción afecta tu

de ventana.

respuesta?)

P I E N S A Y C L A S I F I C A (A N Á L I S I S)

43. Ella mira su rostro en un espejo de mano. Clasifica la

45. Rayos de luz idénticos entran en tres bloques

cantidad de rostro que ve en las tres posiciones, de mayor

transparentes compuestos de diferentes materiales. La

a menor (¿o es la misma en todas las posiciones?).

luz frena al entrar en los bloques. Clasifica los bloques de

acuerdo con la rapidez con que viaja la luz en cada caso,

de mayor a menor.

u

u

u

A

B

C

44. Las ruedas de un carro de juguete ruedan desde una acera

de concreto hacia las siguientes superficies: A, un camino

A

B

C

pavimentado; B, un jardín con césped, y C, césped muy

recortado en el green de un campo de golf. Debido al

46. Rayos de luz idénticos en aire se refractan al entrar en

frenado, cada conjunto de ruedas se dobla en la frontera

tres materiales transparentes: A, agua, donde la rapidez

y se desvía de su curso inicial en línea recta. Clasifica las

de la luz es 0.75 c; B, alcohol etílico (rapidez 0.7 c), y superficies de acuerdo con la cantidad que se dobla cada

C, vidrio crown (rapidez 0.6 c). Clasifica los materiales conjunto de ruedas en la frontera, de la mayor cantidad

de acuerdo con cuánto se dobla el rayo de luz hacia la

de doblado a la menor.

normal, de mayor doblado a menor doblado.

A

B

C

A

B

C

P I E N S A Y E X P L I C A (S Í N T E S I S)

47. Este capítulo abrió con una fotografía del instructor de

50. En las imágenes múltiples de la profesora de física

física Peter Hopkinson que parece flotar sobre la mesa.

Karen Jo Matsler en la fotografía al inicio del capítulo,

No lo hace. Explica cómo crea esta ilusión.

¿cuántos espejos se utilizaron?

48. En la fotografía del pato de pie sobre la roca, al inicio del

51. El principio de Fermat es de tiempo, no de distancia

capítulo, ¿por qué los pies del pato no se muestran en la

mínima. ¿La distancia mínima se aplicaría también para

visión reflejada?

la reflexión? ¿Para la refracción? ¿Por qué tus respuestas

49. En la fotografía del profesor de física Fred Myers

son diferentes?

tomando una fotografía de su hija McKenzie, al inicio del

capítulo, ¿cuántos espejos se utilizaron? Explica.

C A PÍ T U LO 28 R E V ISI Ó N

541

52. Tu ojo en el punto P mira en el espejo. ¿Cuál de las

64. El dibujo muestra a una persona y a su gemela a distancias

tarjetas numeradas puedes ver reflejada en el espejo?

iguales en lados opuestos de una pared delgada. Supón

que se recortará una ventana en la pared de modo que

P

cada gemela pudiera tener una visión completa de la

otra. Muestra el tamaño y la ubicación de la ventana más

Espejo

pequeña que puede recortarse en la pared para conseguirlo.

(Sugerencia: dibuja rayos de la parte superior de la cabeza de 53. El vaquero Joe quiere disparar a su atacante rebotando

cada gemela a los ojos de la otra gemela. Haz lo

una bala en una placa metálica reflejante. Para hacer esto,

mismo de los pies de cada una a los ojos de la otra.)

¿debería apuntar simplemente a la imagen especular de su atacante? Explica.

54. ¿Por qué el letrero en el frente de algunos vehículos "está al revés"?

65. Puedes decir si las personas son miopes o hipermétropes

AMBULANCIA

si observas el tamaño de sus ojos a través de sus gafas.

55. Con frecuencia, los camiones tienen señales en la parte

Cuando los ojos de una persona parecen amplificados, ¿la

trasera que dicen "si no puedes ver mis espejos, no puedo

persona es miope o hipermétrope?

verte". Explica la física aquí.

66. Si una persona miope quiere gafas más delgadas, ¿se

56. Cuando te miras en el espejo y saludas con tu mano

recomienda un índice de refracción más alto o más bajo

derecha, tu hermosa imagen saluda con la mano

para sus gafas?

izquierda. Entonces, ¿por qué los pies de tu imagen no se

67. Tu amigo dice que la longitud de onda de las ondas

contonean cuando sacudes la cabeza?

de luz es más corta en el agua que en el aire y cita la

57. Los espejos de los automóviles no tienen ningún

Figura 28.25 como evidencia. ¿Estás de acuerdo o en

recubrimiento en la superficie frontal y están plateados

desacuerdo, y por qué?

en la superficie posterior. Cuando el espejo se ajusta de

68. Un par de ruedas de un carro de juguete ruedan de

manera correcta, la luz proveniente de atrás se refleja de la

manera oblicua desde una superficie lisa hacia dos

superficie plateada hacia los ojos del conductor. Bien. Pero

terrenos con césped, uno rectangular y otro triangular,

esto no es tan bueno en la noche con el destello de los faros

como se muestra. El terreno está sobre una ligera

desde atrás. Este problema se resuelve con la forma de cuña

pendiente, de modo que, después de frenar en el césped,

del espejo (véase el dibujo). Cuando el espejo se inclina un

las ruedas de nuevo adquirirán rapidez cuando salgan

poco hacia arriba, hacia la posición "nocturna", el destello

se dirige hacia arriba, hacia el techo, lejos de los ojos del

conductor. Sin embargo, el conductor todavía puede ver los

automóviles detrás suyo en el espejo. Explica.

Césped

Césped

Día

Noche

sobre la superficie lisa. Termina cada dibujo y muestra

algunas posiciones de las ruedas dentro de los terrenos y

en los otros lados, de modo que indiquen la dirección de viaje.

58. Una persona en una habitación oscura que mira por la ventana puede ver con claridad a una persona afuera en la luz de día, en tanto que la persona que está afuera no puede ver a la persona en el interior. Explica.

59. ¿Cuál es la ventaja de tener páginas mate (no brillosas) en este libro en lugar de páginas con una superficie más brillante?

60. ¿Cuál debe ser la longitud mínima de un espejo plano para que puedas ver una imagen completa tuya?

61. ¿Qué explican las grandes sombras proyectadas por los extremos de las delgadas patas del insecto sobre el agua?

61. ¿Qué efecto tiene tu distancia del espejo plano en tu respuesta al ejercicio anterior? (¡Inténtalo y observa!)

62. Sostén un espejo de bolsillo casi a la distancia de tu brazo

69. Un pulso de luz roja y un pulso de luz azul entran en un bloque de vidrio al mismo tiempo, normales a su superficie. Estrictamente hablando, después de pasar a través del bloque, ¿cuál pulso sale primero?

70. Durante un eclipse lunar, la Luna no está oscura por completo, sino en general de un rojo oscuro. Explica esto en términos de la refracción de todos los atardeceres y amaneceres en el mundo.

desde tu cara y observa cuánto de tu cara puedes ver. Para ver más de tu cara, ¿debes sostener el espejo más cerca o más lejos, o deberías tener un espejo más grande? (¡Inténtalo y observa!)

63. En un espejo empañado, límpialo sólo lo suficiente como para ver tu cara completa. ¿Qué tan alta será el área limpiada, comparada con la dimensión vertical de tu cara?

72. Cuando te paras con la espalda hacia el Sol, ves un
circulares de luz que rodean a Lillian bajo el árbol
arcoíris como un arco circular. ¿Podrías moverte hacia
iluminado por el Sol que se muestra en la fotografía?
un lado y entonces ver el arcoíris como un segmento de
elipse en lugar del segmento de un círculo (como sugiere
la Figura 28.33)? Defiende tu respuesta.

73. ¿Por qué los googles permitirán a un nadador bajo el agua
enfocar con más claridad lo que observa?

74. Si un pez usara googles arriba de la superficie del agua,
¿por qué la visión del pez sería mejor si los googles
estuvieran llenos de agua? Explica.

75. ¿Un diamante bajo el agua destella más o menos que en
el aire? Defiende tu respuesta.

76. Cubre la mitad superior de la lente de una cámara. ¿Qué

efecto tiene esto sobre las imágenes tomadas?

85. En términos de longitud focal, ¿qué tan lejos detrás de

77. ¿Qué ocurrirá con la imagen proyectada sobre una

la lente de la cámara se ubica una superficie fotosensible

pantalla por una lente cuando cubres un tercio de la lente

cuando se fotografían objetos muy distantes?

con un filtro rojo, un tercio con un filtro verde y un

86. ¿Por qué las diapositivas en un antiguo proyector se

tercio con un filtro azul? (¡Inténtalo y observa!)

ponen de cabeza?

78. ¿Cómo podría hacerse una lente convergente para ondas

87. La imagen producida por una lente convergente está

sonoras? (Dicha lente, una bolsa esférica de gas, es una

de cabeza. Tus ojos tienen lentes convergentes. ¿Esto

característica del Exploratorium de San Francisco.)

significa que las imágenes que ves están de cabeza en tu

79. ¿Los telescopios refractores y los microscopios

retina? Explica.

amplificarían si la luz tuviera la misma rapidez en vidrio

88. Las imágenes producidas por la lente convergente de una

que en aire? Defiende tu respuesta.

cámara están de cabeza. ¿Esto significa que las fotografías

80. Existe menos diferencia entre la rapidez de la luz en vidrio

tomadas con la cámara están de cabeza?

y la rapidez de la luz en agua, que la que existe entre la

89. Los mapas de la Luna están de cabeza. ¿Por qué?

rapidez de la luz en vidrio y la rapidez de la luz en aire.

90. ¿Por qué los ancianos que no usan gafas leen los libros

¿Esto significa que una lupa amplificará más o amplificará

más alejados de los ojos que los jóvenes?

menos cuando se use bajo el agua en lugar de en aire?

91. Cuando Stephanie Hewitt sumerge una barra de

81. Las ondas no se traslapan en la imagen de una cámara

vidrio en aceite vegetal, la parte sumergida de la barra

estenopeica. ¿Esta característica contribuye a una imagen

es invisible. ¿Qué te dice esto acerca de las rapideces

clara o a una imagen borrosa?

relativas de la luz en el vidrio y en el aceite? O, planteado

82. ¿Por qué la claridad de la imagen en una cámara estenopeica

de otra forma: ¿cómo se comparan los índices de

no depende de la posición de la pantal a de visualización?

refracción, n, para el vidrio y el aceite?

83. Mientras que los orificios proporcionan imágenes

definidas, las lentes con grandes aperturas son

convenientes para las cámaras espías de los aviones de

vuelo alto. ¿Por qué?

84. Si apuntas al Sol la cámara estenopeica de la pregunta 82,

en la pantalla de visualización se verá una imagen solar

clara y brillante. ¿Cómo se relaciona esto con las manchas

P I E N S A Y D I S C U T E (E V A L U A C I Ó N)

92. Para reducir el brillo de los alrededores, las ventanas de

93. ¿Qué tipo de superficie de la carretera es más fácil de ver

algunas tiendas departamentales, en lugar de ser verti-

cuando conduces de noche: una superficie empedrada

cales, se inclinan hacia adentro en la parte de abajo. Dis-

dispareja o una superficie lisa como un espejo? Discute

cute por qué esto reduce el brillo.

por qué es difícil ver el camino enfrente de ti cuando

conduces en una noche lluviosa.

C A PÍ T U LO 28 R E V ISI Ó N

94. ¿Por qué la luz reflejada del Sol o la Luna parece una

101. Cuando un pez en un estanque mira hacia arriba a un

columna en el cuerpo de agua que se muestra? ¿Cómo se

ángulo de 458, ¿ve el cielo arriba de la superficie del

vería la luz reflejada si la superficie del agua fuese per-

agua o un reflejo de la frontera agua-aire del fondo del

fectamente lisa?

estanque? Defiende tu respuesta.

102. Los rayos de luz que se mueven hacia arriba a través

del agua hacia la frontera agua-aire a ángulos mayores

a 488 con respecto a la normal se reflejan en su totali-

dad. Ningún rayo más grande que 488 se refracta hacia

afuera. ¿Y qué hay de lo contrario? ¿Existe un ángulo al

cual los rayos de luz en el aire que encuentren la frontera

aire-agua se reflejarán en su totalidad? ¿O alguna luz se

refractará en todos los ángulos?

103. Si fueras a enviar un haz de luz láser a una estación espa-

cial arriba de la atmósfera, que parezca estar justo arriba

95. ¿Qué es lo que ves exactamente cuando observas un

del horizonte, ¿apuntarías el láser hacia arriba, hacia

espejismo de "agua sobre el camino"?

abajo o hacia la estación espacial visible? Defiende tu

96. ¿Qué está mal con la caricatura del hombre que se mira

respuesta.

en el espejo? (Pide a un amigo que se ponga frente a un

104. Dos observadores apartados uno del otro no ven el

espejo como se muestra y lo verás.)

"mismo" arcoíris. Explica.

105. Un arcoíris visto desde un avión puede formar un círculo completo. ¿Dónde aparecerá la sombra del avión? Explica.

106. ¿En qué se parece un arcoíris al halo que a veces se ve alrededor de la Luna en una noche helada? Si no tienes la respuesta, busca en Internet y observa cómo difieren los arcoíris y los halos.

107. Las cubiertas plásticas transparentes para albercas, llamadas hojas de calor solar, tienen miles de pequeñas bur-

97. Un haz de luz se dobla como se muestra en (a), mientras

bujas llenas de aire que parecen lentes. Se dice que

que los bordes del cuadrado sumergido se doblan como

las burbujas de estas hojas enfocan el calor del Sol hacia

se muestra en (b). ¿Estas imágenes son contradictorias?

el agua, lo que en consecuencia aumenta su temperatura. Explica.

¿Crees que estas burbujas dirigen más energía solar hacia el agua? Defiende tu respuesta.

108. ¿La intensidad promedio de la luz solar, medida por un luxómetro en el fondo de la alberca de la Figura 28.46, sería diferente si el agua estuviera quieta?

109. Cuando tu ojo está sumergido en agua, los rayos de

luz se doblan sólo un poco cuando pasan del agua a tu córnea. ¿Por qué el doblado no es tan pronunciado como cuando la luz pasa del aire a tu córnea? (¿Cómo difieren

(a)

(b)

los índices de refracción de tu córnea, el aire y el agua?)

98. Cuando una linterna sumergida en agua alumbra hacia el aire de arriba, ¿la rapidez de la luz aumenta o disminuye cuando la luz pasa del agua al aire?

99. Si, mientras estás de pie sobre el lecho de un río, quieres arponear un pez bajo la superficie del agua frente a ti, ¿debes apuntar hacia arriba, hacia abajo o directamente al pez observado para hacer un blanco directo? Si, en vez de ello, apuntas al pez con un láser, ¿debes apuntar arriba, abajo o directamente al pez observado? Defiende tu respuesta.

110. Cuando tu ojo está sumergido en agua, ¿la rapidez de la luz aumenta, disminuye o permanece constante mientras pasa del agua a tu córnea?

111. En el dibujo que acompaña a la nota 3 a pie de la página 535, que se repite aquí, se muestran dos rayos. Analiza si estos dos rayos producen la imagen o simplemente ubican dónde está la imagen en relación con la lente.

Imagen

Objeto

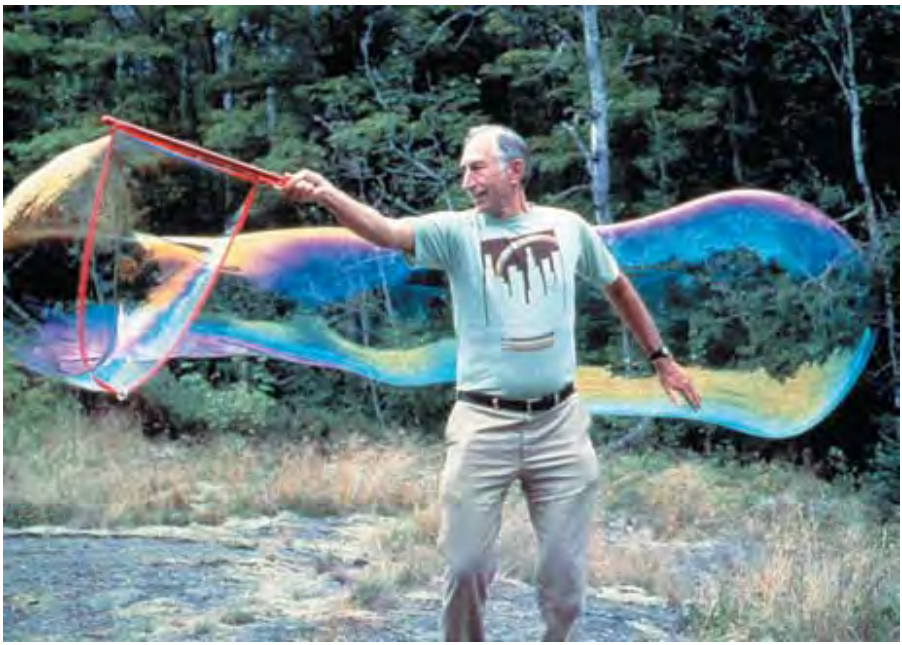
tu respuesta.

real

100. Si el pez del ejercicio anterior fuese pequeño y azul y

tu láser fuera rojo, ¿qué correcciones deberías hacer?

Explica.



29 1

C A P Í T U L O 2 9

Ondas de luz

2

29.1 Principio de Huygens

29.2 Difracción

3

29.3 Superposición e interferencia

29.4 Interferencia en películas delgadas

29.5 Polarización

29.6 Holografía

4

1 Robert Greenler muestra colores de interferencia con una gran pompa de jabón. 2 Esta fotografía es muy estimada por los profesores de física Marshall Ellenstein y Helen Yan, quienes estaban

en el estacionamiento del Cal Tech discutiendo los diagramas de Feynman en la camioneta de Feynman cuando Richard Feynman pasó… y accedió a tomarse la fotografía. 3 La neozelandesa Jennie McKelvie muestra el comportamiento ondulatorio con un tanque de ondas. 4 Para introducir a sus alumnos en el estudio de la polarización, Janie Head compara cómo una soga sacudida a través de la rejilla metálica se relaciona con el paso de la luz a través de un Polaroid.

C A PÍ T U LO 29 O N DA S D E LU Z

blanco mostraba la reflexión de cualquier color de luz que incidiera sobre el a. Para los estudiantes de Marshall la física

Después de que Física conceptual se publicara por primera vez en 1971, me reuní con Marshall El enstein en una conferencia de física en Chicago. Él no era algo escondido en los libros o en los anaqueles del fue uno de los primeros profesores en adoptar el libro que

laboratorio.

él había intentado escribir. Marshall me invitó a cenar a su

Marshall nunca escribió su libro de física. En vez de el o,

casa en Chicago con él y su esposa. También me invitó a

me dio ideas continuamente en el transcurso de los años, de

sus clases en el bachil erato donde trabajaba. Acepté ambas

ahí los muchos "Gracias a Marshall El enstein" en los pies de

invitaciones y desde entonces hemos sido grandes amigos.

las páginas del Libro de prácticas y en las Preguntas de segui-

Marshal , ahora retirado, esta-

miento. Marshall editó videos de mis conferencias en clase,

ba entre los mejores profesores de

en los primeros años en el City Col ege de San Francisco,

física de Chicago. Además de su

y en los últimos años en la University of Hawai , y digitalizó

pasión por enseñar física, es un dichos videos, que ahora están disponibles "a petición" para mago consumado y ganador de las personas que usen dispositivos electrónicos como teléfonos premios tanto en jitterbug como

inteligentes, iPad o computadoras. Marshall también publi-

en bridge. Como maestro, está có la serie "Hewitt drew it" (Hewitt lo dibujó) en YouTube.

convencido de que la física es Los videos y los screencast se mencionan a lo largo del libro.

muy emocionante y relevante Menos visibles son sus muchas ideas dentro de los párrafos para la vida cotidiana como para

del libro y las figuras. En este capítulo, por ejemplo, Mars-

no formar parte importante de la

hall sugirió la sección acerca de visualización tridimensional

enseñanza. Puesto que él posee todas las cualidades que cons-

y proporcionó el estereograma generador por computadora

tituyen a un gran profesor, sus clases de física rebosaban de

de la Figura 29.41. Me exhortó a presentar hologramas y me

alumnos ansiosos por aprender. Un proyecto final en la época

ayudó a adaptar temas en todo el libro.

cuando lo visité consistía en pedir a cada estudiante que hicie-

Al igual que muchos profesores, Marshall comenzaba la

ra un libro de recortes con diez fotografías que mostraran la

física con el estudio de la luz en lugar de la mecánica; su expe-

física en la vida diaria. La conclusión, que revelaba ya bien

riencia le decía que la luz era un mejor gancho para captar el

terminado el curso, después de que le enviaban todas las interés inicial del estudiante. Este capítulo comienza como fotografías, era que cualquier fotografía mostraba a la física; Marshall lo hizo en sus cursos, con la naturaleza ondulatoria

que la física estaba en todas partes. Incluso una fotografía en de la luz.

29.1 Principio de Huygens

Lanza una roca en un estanque de aguas tranquilas y aparecen ondas sobre la superficie del agua. Golpea un diapasón y ondas de sonido se dispersan en todas direcciones.

Enciende un fósforo y ondas de luz se expanden por igual en todas direcciones. En 1678, un físico danés, Christian Huygens, estudió el comportamiento ondulatorio y propuso que los frentes de onda de las ondas de luz que se propagan desde una fuente puntual pueden considerarse como las crestas traslapadas de pequeñas ondas secundarias (Figura 29.2): que los frentes de onda están constituidos de frentes de onda más pequeños. A esta idea se le conoce como principio de Huygens:

F I G U R A 2 9 . 1

Las ondas de agua forman círculos

Todo punto de un frente de onda puede considerarse como la fuente de peque- concéntricos.

ñas ondas secundarias que se propagan en todas direcciones con una rapidez igual a la rapidez de propagación de las ondas.

F I G U R A 2 9 . 2

Estos dibujos son del libro de Huygens

Treatise on Light. (Tratado sobre la luz.)

La luz proveniente de A se expande en

forma de frentes de onda, cada punto de

los cuales se comporta como si fuese una

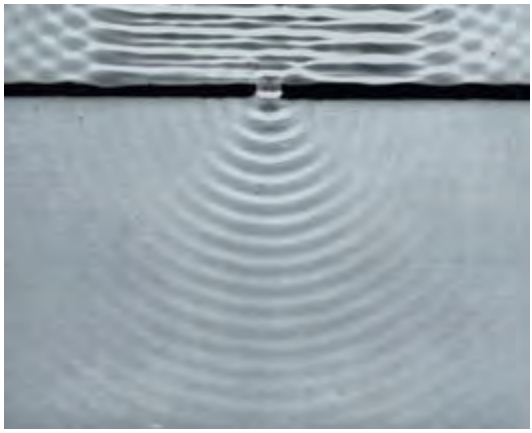
nueva fuente de ondas. Las pequeñas

ondas secundarias que parten de b, b,

b, b forman un nuevo frente de onda

(dddd); las pequeñas ondas secundarias

que parten de d, d, d, d forman otros nuevos frentes de onda (DCEF).



Fuente

Considera el frente de onda esférico de la Figura 29.3. Puedes ver

A

A′

B′

B

que, si todos los puntos a lo largo del frente de onda AA9 son fuentes de nuevas ondas más pequeñas, entonces poco tiempo después las nuevas

Frente de onda

ondas traslapadas formarán una nueva superficie, BB9, que puede con-

siderarse como la envoltura de todas las ondas pequeñas. En la figura sólo se muestran algunas del infinito número de pequeñas ondas provenientes de algunas fuentes puntuales secundarias a lo largo de AA9

Nuevo frente

que se combinan para producir la envoltura lisa BB9. Conforme la onda de onda

se propaga, un segmento parece menos curvo. Muy lejos de la fuente

F I G U R A 2 9 . 3

original, las ondas casi forman un plano, como lo hacen las ondas del El principio de Huygens aplicado a un

Sol, por ejemplo. En la Figura 29.4 se muestra una construcción en pequeñas ondas frente de onda esférico.

de Huygens para frentes de onda planos. En la Figura 29.5 puedes ver las leyes de reflexión y refracción ilustradas mediante el principio de Huygens.

F I G U R A 2 9 . 4

El principio de Huygens aplicado a un

A

A′

frente de onda plano.

Frente de onda

Nuevo frente de onda

B

B′

F I G U R A 2 9 . 5

El principio de Huygens aplicado a (a) la reflexión y (b) la refracción. Observa que los rayos y los frentes de onda son perpendiculares entre sí.

(a)

(b)

F I G U R A 2 9 . 6

Puedes generar ondas planas en
La regla de un metro que oscila crea
el agua cuando sumerges sucesiva-
ondas planas en el tanque de agua. El
mente en la superficie un objeto
agua que oscila en la abertura actúa
con borde recto, como un metro,
como una fuente de ondas. El agua se

sostenido de forma horizontal (Fi-

difracta a través de la abertura.

gura 29.6). Las fotografías de la

Figura 29.7 son vistas superiores de

un tanque de ondas en el cual las

ondas planas inciden sobre aberturas de varios tamaños (no se muestra el objeto con borde recto). En (a), donde la abertura es ancha, se ven las ondas planas seguir a través (a)

(b)

(c)

F I G U R A 2 9 . 7

Ondas planas que pasan por aberturas de varios tamaños. Mientras más pequeña es la abertura, mayor es el doblamiento de las ondas en los bordes; en otras palabras, mayor es la difracción.

C A PÍ T U LO 29 O N DA S D E LU Z

547

de la abertura sin cambio, excepto en las esquinas, donde las ondas se doblan hacia la re -

gión de sombra, como predice el principio de Huygens. A medida que el ancho de la abertura se estrecha, como en (b), se transmite cada vez menos de la onda incidente, y la propagación de las ondas en la región de sombra se vuelve más pronunciada. Cuando la abertura es pequeña comparada con la longitud de onda de la onda incidente, como en (c), la veracidad de la idea de Huygens de que cada parte de un frente de onda puede considerarse como una fuente de nuevas ondas pequeñas se vuelve bastante evidente. A medida que las ondas inciden sobre la abertura estrecha, se observa fácilmente que el agua que chapotea hacia arriba y hacia abajo en la abertura actúa como una fuente "puntual" de las nuevas ondas que se abren en abanico en el otro lado de la barrera. Se dice que las ondas se difractan cuando se propagan hacia la región de sombra.

29.2 Difracción

En el Capítulo 28 aprendiste que la luz puede doblar su trayectoria ordinaria en línea Si alguien en otra habitación te

recta mediante reflexión y refracción, y ahora aprenderás otra forma en la que la luz llama a la puerta, el sonido parece

se dobla. Cualquier doblamiento de la luz por otro medio distinto a la reflexión y la provenir de la puerta (a menos que

refracción se llama difracción. Difracción es el doblamiento de la luz cuando ésta pasa tengas paredes muy delgadas).

por el borde de un objeto, lo que crea un borde difuso. También ocurre cuando una onda pasa por una abertura. La difracción de las ondas de agua planas que se muestra en la Figura 29.7 sucede para todo tipo de ondas, incluidas las ondas de luz.

F I G U R A 2 9 . 8

(a) La luz proyecta una sombra nítida

Ventana

con cierta borrosidad en sus bordes

Rendija

cuando la abertura es grande compara-

ancha

angosta

da con la longitud de onda de la luz.

Fuente de luz

Fuente de luz

(b) Cuando la abertura es muy angosta,

la difracción es más evidente y la som-

bra es más borrosa.

Sombra

(a)

(b)

Sombra

Cuando la luz pasa por una abertura que es grande comparada con la longitud de onda de la luz, ésta proyecta una sombra como la mostrada en la Figura 29.8a. Se observa una frontera bastante definida entre la luz y las áreas oscuras de la sombra. Pero si la Ancho

luz pasa por una rendija hecha con una hoja de rasurar delgada

sobre un cartón opaco, de rendija

se ve que la luz se difracta (Figura 29.8b). La frontera definida entre la luz y las áreas Intensidad

oscuras desaparece y la luz se extiende como un abanico y produce un área brillante que Ancho de pantalla

se desvanece hacia la oscuridad sin bordes definidos. La luz se difracta.

F I G U R A 2 9 . 9

En la Figura 29.9 aparece una gráfica de la distribución de intensidad de la luz difrac- Interpretación gráfica de luz difractada a tada a través de una sola rendija delgada. Debido a la difracción, hay un aumento gradual través de una sola rendija delgada.

de la intensidad luminosa en lugar de un cambio abrupto de oscuridad a claridad. Un fotodetector que barriera la pantal a percibiría un cambio

gradual desde la ausencia de luz hasta la máxima intensidad

de luz. (En realidad, existen delgadas franjas con intensidad a

cualquier lado del patrón principal; dentro de poco verás que

éstas son prueba de la interferencia, que es más pronunciada

con una doble rendija o con múltiples rendijas.)

SCREENCAST: Difracción

La difracción no está confinada a rendijas estrechas o

a aberturas en general, sino que puede verse para todas las

sombras. En un análisis detallado, incluso la sombra más

defi nida es un poco borrosa en el borde. Cuando la luz

F I G U R A 2 9 . 1 0

es de un solo color (monocromática), la difracción puede

Las franjas de difracción son evidentes

producir franjas de difracción en el borde de la sombra,

en las sombras de una luz láser mono-

cromática (con una sola frecuencia).

como en la Figura 29.10. En la luz blanca, las franjas se

Estas franjas se rellenarían con multitu-

mezclan para crear una mancha borrosa en el borde de

des de otras franjas si la fuente fuera de

una sombra.

luz blanca.

La cantidad de difracción depende de la longitud de onda de la onda comparada con el tamaño de la obstrucción que proyecta la sombra. Las ondas más largas se difractan más. Son mejores para llenar sombras, razón por la cual los sonidos de las sirenas de niebla son ondas largas de frecuencia baja: para llenar cualquier "punto ciego". Lo mismo ocurre con las ondas de radio de la banda de transmisión AM estándar, que son muy largas comparadas con el tamaño de la mayoría de los objetos en su trayectoria.

Las longitudes de onda de las ondas de radio AM van de 180 a 550 metros, y las ondas se doblan con facilidad alrededor de edificios y otros objetos que de otro modo estor-barían su paso. Una onda de

radio con una longitud de onda larga no "ve" un edificio relativamente pequeño en su trayectoria, pero una onda de radio con una longitud de onda corta sí lo ve. Las ondas de radio de la banda FM van de 2.8 a 3.4 metros y no se doblan muy bien alrededor de los edificios. Ésta es una de las razones por las que la recepción FM con frecuencia es mala en ubicaciones donde AM llega fuerte y claro. En el caso de la recepción de radio, no se quieren "ver" los objetos en la trayectoria de las ondas de radio, de modo que la difracción no es algo malo.

F I G U R A 2 9 . 1 1

(a) Las ondas tienden a dispersarse hacia

la región de sombra.

(b) Cuando la longitud de onda tiene

más o menos el tamaño del objeto, la

sombra pronto se llena.

(c) Cuando la longitud de onda es corta

en relación con el tamaño del objeto, se

proyecta una sombra más definida.

(a)

(b)

(c)

La difracción no es muy agradable cuando ves objetos muy pequeños con un microscopio. Si el tamaño de un objeto es aproximadamente el mismo que la longitud de onda de la luz, la difracción nubla la imagen. Si el objeto es más pequeño que la longitud de onda de la luz, no puede verse ninguna estructura. Toda la imagen se pierde por la difracción.

No hay amplificación o perfección del diseño del microscopio que permita superar este límite de difracción fundamental.

Para reducir al mínimo este problema, los microscopistas pueden iluminar los objetos pequeños con haces de electrones en lugar de luz. En relación con las ondas de luz, los haces de electrones tienen

longitudes de onda en extremo cortas. Los microscopios electrónicos aprovechan el hecho de que toda la materia tiene propiedades ondulatorias: un haz de electrones tiene una longitud de onda más corta que los de la luz visible. En un microscopio electrónico, en lugar de lentes ópticos se utilizan campos eléctricos y magnéticos para enfocar y amplificar las imágenes.

El que los detal es más pequeños puedan verse mejor con longitudes de onda más cortas es un hecho que el delfín emplea perfectamente cuando escanea su entorno con La difracción ocurre cuando una

onda pasa por una abertura o por

ultrasonido. Los ecos del sonido con longitud de onda larga brindan al delfín una imagen el borde de un objeto.

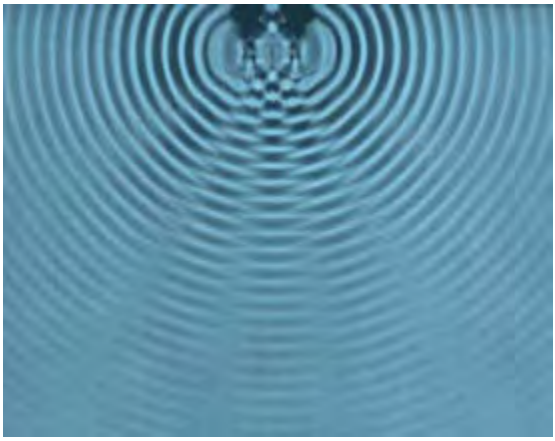
global de los objetos de su entorno. Para examinar con más detal e, el delfín emite sonidos con longitudes de onda más cortas. Como estudiaste en el Capítulo 20, el delfín siempre ha hecho de manera natural lo que los médicos ahora pueden hacer con los dispositivos de visualización ultrasónica.

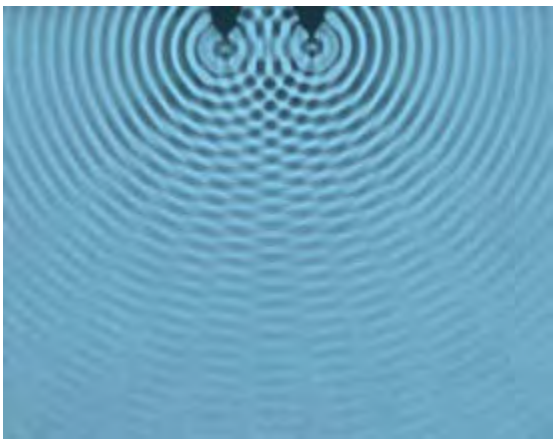
P U N T O D E C O N T R O L

¿Por qué un microscopista utiliza luz azul en lugar de luz blanca para iluminar los objetos que observa?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Hay menos difracción con la luz azul de longitud de onda más corta, de modo que el microscopista ve más detalles (como un delfín hermosamente investiga los detalles finos de su entorno con los ecos de sonido con longitudes de onda ultracorta).





C A PÍ T U LO 29 O N DA S D E LU Z

549

29.3 Superposición e interferencia

Cuando dos ondas interactúan, la amplitud de la onda resultante es la suma de las amplitudes de las dos ondas. A esto se le conoce como

principio de superposición.

En general, este fenómeno se describe como interferencia (de acuerdo con lo que se estudió en los Capítulos 19 y 20). En la Figura 29.12 se revisan las interferencias cons- SCREENCAST: Interferencia de la luz tructiva y destructiva. Se observa que la superposición de un par de ondas idénticas en fase mutua produce una onda de la misma frecuencia pero con el doble de amplitud.

Si las ondas están exactamente media longitud de onda fuera de fase, su superposición da por resultado una cancelación completa. Si están fuera de fase por otras cantidades, ocurre una cancelación parcial.

F I G U R A 2 9 . 1 2

Interferencia de ondas.

Cancelación

Reforzamiento

Cancelación

parcial

(a)

(b)

(c)

La interferencia de las ondas en el agua es un fenómeno que se observa con frecuencia, como se muestra en la Figura 29.13. En algunos lugares, las crestas traslapan con crestas; en otros lugares, las crestas traslapan con valles de otras ondas.

F I G U R A 2 9 . 1 3

Interferencia de ondas de agua.

Bajo condiciones más controladas, un par de fuen-

tes de ondas colocadas lado a lado producen patrones

interesantes (Figura 29.14). La superficie del agua en

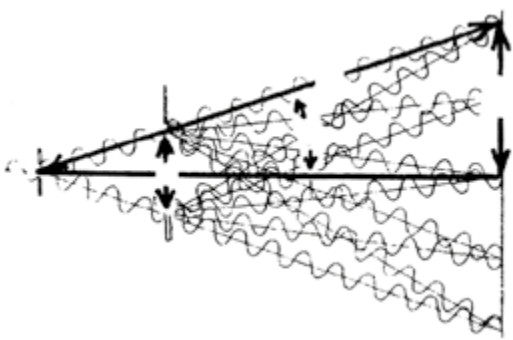
tanques poco profundos (tanques de ondas similares al de Jennie en la tercera fotografía de apertura de capítulo) se golpea con cierta frecuencia en dos lugares mientras los patrones producidos se fotografían desde arriba. Observa que las zonas de interferencia constructiva y destructiva se extienden hasta los lados de los tanques de ondas, donde el número de

F I G U R A 2 9 . 1 4

estas regiones y su tamaño dependen de la distancia entre las fuentes de ondas y de la Patrones de interferencia de ondas longitud de onda (o la frecuencia) de las ondas. La interferencia no se limita a las ondas traslapadas provenientes de dos fuentes de agua que puedes ver con facilidad, sino que es una propiedad de todas las ondas.

vibratorias.

En 1801, la naturaleza ondulatoria de la luz se demostró de un modo convincente cuando el físico y médico británico Thomas Young realizó su ahora famoso



F I G U R A 2 9 . 1 5

Dibujo original de Thomas Young de

un patrón de interferencia producido

por dos fuentes. Los círculos oscuros

representan crestas de onda; los espacios

blancos entre las crestas representan

valles. La interferencia constructiva

ocurre donde las crestas se traslapan con

otras crestas o los valles se traslapan

con otros valles. Las letras C, D, E

y F marcan regiones de interferencia

experimento de interferencia.1 Young descubrió que la luz dirigida a través de dos destructiva.

orificios puntuales cercanos entre sí se recombina y produce franjas de brillo y oscuridad sobre una pantalla detrás. Las franjas brillantes se forman cuando una cresta de la onda luminosa que pasa por un orificio y una cresta de la onda luminosa que pasa por el otro orificio llegan a la pantalla al mismo tiempo. Las franjas oscuras se forman cuando una cresta de una onda y un valle de la otra llegan al mismo tiempo. La Figura 29.15 muestra el dibujo de Young del patrón de ondas superpuestas procedentes de dos fuentes. Cuando su experimento se realizó con dos rendijas cercanas, en lugar de orificios puntuales, los patrones de franjas son líneas rectas (Figura 29.17).

F I G U R A 2 9 . 1 6

Las franjas bril antes se forman cuando las

Zona

ondas provenientes de ambas rendijas llegan

Zona

brillante

en fase; las zonas oscuras son resultado del

oscura

traslape de ondas que están fuera de fase.

Brillante

S

Oscura

Luz monocromática

M

O

Brillante

N

Doble rendija

Oscura

Patrón

de interferencia

Brillante

F I G U R A 2 9 . 1 7

Cuando la luz monocromática pasa por dos rendijas

F I G U R A 2 9 . 1 8

cercanas entre sí, se produce un patrón de interferencia

La luz proveniente de O pasa por las rendijas M y N y produce un

formado por rayas.

patrón de interferencia sobre la pantalla S.

En la Figura 29.18 se observa cómo la serie de líneas brillantes y oscuras es resultado de las diferentes longitudes de las trayectorias

que van de las rendijas a la pantalla.2 Para la franja brillante central, las trayectorias de las dos rendijas tienen 1Thomas Young leía con fluidez a los 2 años de edad; a los 4, ya había leído la Biblia dos veces; a los 14, sabía ocho idiomas. En su vida adulta, fue un médico y científico que contribuyó a la comprensión de los fluidos, el trabajo y la energía, así como de las propiedades elásticas de los materiales. Fue la primera persona en lograr avances en Claro

el desciframiento de los jeroglíficos egipcios. No hay duda de ello: ¡Thomas Young fue un muchacho brillante!

2En el laboratorio puedes determinar la longitud de onda de la luz con mediciones basadas en la Figura 29.18.

D

y

M

Oscuro

La ecuación para el primer máximo de interferencia fuera del centro para dos o más rendijas es O

5 d sen

d

Claro

donde es la longitud de onda de la luz que se difracta, d es la distancia entre las rendijas adyacentes y es el ángulo entre líneas respecto de la franja de luz central y la primera franja de interferencia constructiva fuera del Oscuro

centro. De acuerdo con el diagrama, sen es la razón entre la distancia y la distancia D, donde y es la distancia sobre la pantalla entre la franja central de luz y la primer franja de interferencia constructiva en cualquier lado, Claro

y D es la distancia entre las franjas y las rendijas (que, en la práctica, es mucho mayor que lo mostrado aquí).

la misma longitud y, por tanto, las ondas llegan en fase y se refuerzan entre sí. Las franjas oscuras en cualquier lado de la franja central resultan de una trayectoria que es más larga (o más corta) por media longitud de onda, de modo que las ondas llegan media longitud de onda fuera de fase. Los otros conjuntos de franjas oscuras ocurren donde las trayectorias difieren por múltiplos nones de media longitud de onda: 3/2, 5/2, y así sucesivamente.

(a)

Al realizar este experimento con doble rendija, supón que cubres una de las rendijas, de modo que la luz pase sólo por una rendija. Entonces la luz formará un abanico e iluminará la pantalla para

formar un patrón de difracción simple, como se estudió antes (Figuras 29.8b y 29.9). Si cubres la otra rendija y dejas pasar la luz sólo por la rendija recién descubierta, obtienes la misma iluminación sobre la pantalla, pero desplazada un poco debido a la diferencia en la ubicación de la rendija. Si no tuvieras el conocimiento, Intensidad

esperarías que, con ambas rendijas abiertas, el patrón simplemente fuera la suma de los patrones de difracción de cada una de las rendijas, como lo sugiere la Figura 29.19a. (b) Ancho de pantalla

Pero esto no sucede. Más bien, el patrón formado es uno de bandas de luz y oscuridad alternadas, como se muestra en la Figura 29.19b. Se tiene un patrón de interferencia. F I G U R A 2 9 .1 9

Por cierto: la interferencia de las ondas de luz no crea ni destruye energía luminosa; sólo La luz que se difracta a través de cada una la redistribuye.

de las rendijas dobles no forma una super-

posición de intensidades como se sugiere

en (a). El patrón de intensidades, debido a

P U N T O D E C O N T R O L

la interferencia, es como se muestra en (b).

1. Si las rendijas dobles se iluminaran con luz roja monocromática (una sola frecuencia), ¿las franjas estarían más o menos espaciadas entre sí que si se iluminaran con luz azul monocromática?

2. ¿Por qué es importante usar luz monocromática?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. Más espaciadas. ¿Puedes ver en la Figura 29.18 que, para las ondas más largas de la luz roja, resultaría una trayectoria un poco más larga (y, por tanto, un poco más desplazada) de la rendija de entrada a la pantalla?

2. Si las rendijas difractaran la luz de varias longitudes de onda, las franjas oscuras F I G U R A 2 9 . 2 0

para una longitud de onda se llenarían con las franjas brillantes para otra, lo que En un espectrómetro, puede usarse

resulta en un patrón de franjas no perceptible. Si no has visto esto, asegúrate de una rejilla de difracción en lugar de un

pedir a tu instructor que lo demuestre.

prisma.

Los patrones de interferencia no se limitan a rendijas individuales o dobles. Una multitud de rendijas menos espaciadas constituyen una rejilla de difracción. Estos dispositivos, como los prismas, dispersan la luz blanca en colores. Mientras que un prisma separa los colores de la luz mediante refracción, una rejilla de difracción separa los colores mediante interferencia. Éstas se utilizan en los dispositivos llamados espectrómetros, que estudiarás en el Capítulo 30. Las rejillas de difracción están rayadas con pequeños surcos y dispersan la luz blanca en bandas de color. Son comunes en algunos tipos de bisutería y en las "gafas de fiesta" (Figura 29.21). Las delgadas ranuras de las plumas de algunas aves dispersan hermosos colores. Los colores creados por difracción son especialmente vívidos en las superficies reflectoras de los DVD.

F I G U R A 2 9 . 2 1

Lámparas de un candelabro vistas a

través de gafas de fiesta con una rejilla

de difracción.

29.4 Interferencia en películas delgadas

Lámpara de

Colores vívidos también se producen mediante la doble reflexión de la luz desde las arco de sodio

superficies superior e inferior de películas delgadas. Los colores van desde franjas de luz monocromática hasta los brillantes arreglos de colores que se ven en las pompas de jabón.

Interferencia en películas delgadas de un solo color

Una demostración sencilla de la interferencia de la luz puede montarse con una fuente de luz monocromática y un par de pedazos de vidrio. Una lámpara de vapor de sodio es una buena fuente de luz monocromática. Las dos piezas de vidrio se colocan una encima de la otra, como se muestra en la Figura 29.22. En un extremo, se coloca entre las placas un pedazo de papel muy delgado para proporcionar una película muy delgada de aire con forma de cuña en medio de las placas. Si el ojo está en una posición para ver la Placas de vidrio

imagen reflejada de la lámpara, la imagen no será continua, sino que estará constituida F I G U R A 2 9 . 2 2

por bandas oscuras y brillantes.

Franjas de interferencia producidas

La causa de estas bandas es la interferencia entre las ondas reflejadas por el vidrio cuando luz monocromática se refleja

sobre las superficies superior e inferior de la cuña de aire, como se muestra en la vista desde dos placas de vidrio que tienen

exagerada de la Figura 29.23. La luz que se refleja en el punto P llega hasta el ojo por una cuña de aire entre ellas.

dos trayectorias diferentes. En una de estas trayectorias, la luz se refleja en la parte superior de la cuña de aire; en la otra trayectoria, se refleja en el lado inferior. Si el ojo se enfoca sobre el punto P, ambos rayos llegan al mismo lugar en la retina del ojo. Pero estos rayos recorrieron diferentes distancias y pueden encontrarse en fase o fuera de fase, de acuerdo con el grosor de la cuña de aire; esto es, de cuánta más distancia ha recorrido un rayo en comparación con el otro. Cuando se examina toda la superficie del vidrio, se observan regiones oscuras y brillantes alternadas: las porciones oscuras,

SCREENCAST: Interferencia

donde el grosor del aire es justo el necesario para producir interferencia destructiva, de colores

y las porciones brillantes, donde la cuña de aire se adelgaza o se engrosa justo en la cantidad adecuada para traer por resultado el reforzamiento de la luz. De modo que las bandas oscuras y brillantes son generadas por la interferencia de ondas de luz reflejadas en los dos lados de la película delgada.3

Fuente de luz

El ojo ve una franja oscura

Luz incidente

(interferencia destructiva)

F I G U R A 2 9 . 2 3

Onda reflejada desde la superficie

Reflexión en las superficies superior

Vidrio

inferior del vidrio de arriba

e inferior de una "película delgada de

Onda reflejada desde la superficie

aire". (Una onda se dibujó en negro para

Cuña de aire

P

superior del vidrio de abajo

mostrar cómo está fuera de fase con la

Vidrio

onda azul después de la reflexión.)

3Los cambios de fase en algunas superficies reflejantes también

contribuyen a la interferencia. Por simplicidad y brevedad, este tema se abordará sólo con esta nota. En resumen, cuando la luz en un medio se refleja en la superficie de un segundo medio en el que la rapidez de la luz es menor (cuando existe un mayor índice de refracción), hay un cambio de fase de 180° (esto es, media longitud de onda). Sin embargo, no ocurre un cambio de fase cuando el segundo medio es uno que transmite la luz con mayor rapidez (y tiene un menor índice de refracción). En el ejemplo de la cuña de aire, no ocurre un cambio de fase por la reflexión en la superficie superior vidrio-aire, y sí ocurre un cambio en la superficie inferior aire-vidrio. De modo que, en el ápice de la cuña de aire, donde el grosor tiende a cero, el cambio de fase produce una cancelación, y la cuña es oscura. Lo mismo ocurre con una película jabonosa tan delgada que su grosor es mucho menor que la longitud de onda de la luz.

Por esta razón, las partes de una película que son extremadamente delgadas parecen negras. Las ondas de todas las frecuencias se cancelan.

Si las superficies de las placas de vidrio son perfectamente planas, las bandas son uniformes. Pero si las superficies no son perfectamente planas, las bandas se distorsionan. La interferencia de la luz ofrece un método en extremo sensible para comprobar lo plano de las superficies. Se dice que las superficies que producen franjas uniformes son ópticamente planas; esto significa que las irregularidades en la superficie son pequeñas en relación con la longitud de onda de la luz visible (Figura 29.24).

Cuando una lente que es plana en la parte superior y tiene una ligera curvatura convexa en la parte inferior se coloca en una placa de vidrio ópticamente plana y se ilumina desde arriba con luz monocromática, se produce una serie de anillos claros y oscuros. Este patrón se conoce como anillos de Newton (Figura 29.25). Estos anillos claros y oscuros son del mismo tipo que las franjas observadas con superficies planas.

Ésta es una técnica de comprobación útil para pulir lentes de precisión.

F I G U R A 2 9 . 2 4

Planos ópticos para comprobar lo plano

de las superficies. Las franjas rectas

indican lisura óptica.

F I G U R A 2 9 . 2 5

Anillos de Newton.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Cómo diferirá el espaciamiento entre los anillos de Newton cuando se iluminen con luz roja y con luz azul?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Los anillos estarán más espaciados con la longitud de onda más larga de la luz roja que con las ondas más cortas de la luz azul. ¿Ves la razón geométrica de esto?

Colores de interferencia

Todo mundo ha apreciado el hermoso espectro de colores reflejados en una pompa de jabón o en gasolina sobre una calle mojada. Estos

colores se producen por la interferencia de las ondas de luz. Este fenómeno a menudo se llama iridiscencia y se observa en Los colores de las pompas de

las películas delgadas transparentes.

jabón resultan de la interferencia

Una pompa de jabón se ve iridiscente en la luz blanca cuando el grosor de la película de la luz reflejada en las superficies

jabonosa tiene aproximadamente el mismo tamaño que la longitud de onda de la luz.

interior y exterior de la película

Las ondas luminosas reflejadas desde las superficies exterior e interior de la película jabonosa. Cuando un color

recorren diferentes distancias. Cuando se ilumina con luz blanca, la película puede se cancela, lo que ves es su color

complementario.

ser justo del grosor adecuado en un lugar para generar la interferencia destructiva de, por decir, la luz roja. Cuando la luz roja se sustrae de la luz blanca, la mezcla restante aparecerá como el color complementario del rojo, que es el cian. En otro lugar, donde la película es más delgada, un color diferente puede cancelarse por interferencia, y la luz que se ve será de su color complementario.

Lo mismo ocurre con la gasolina sobre una calle mojada (Figura 29.26). La luz se refleja tanto en la superficie superior de la gasolina como en la superficie inferior gasolina-agua. Si el grosor de la gasolina es tal que cancele el azul, como la figura sugiere, entonces la superficie de la gasolina aparece amarilla a la vista. Esto es porque el azul se sustrae del blanco, lo que deja al color complementario, el amarillo. Entonces, los diferentes colores corresponden a distintos grosores de la película delgada, lo que ofrece un vívido "mapa de contornos" de diferencias microscópicas en las "elevaciones" de la superficie. Sobre un

campo de visión más amplio, pueden verse colores diferentes, incluso si el grosor de la película de gasolina es uniforme. Esto se debe al grosor aparente de la película: la luz que llega al ojo procedente de diferentes partes de la superficie se refleja en diferentes ángulos y atraviesa diferentes grosores. Si la luz incide en un ángulo rasante, por ejemplo, el rayo transmitido en la superficie inferior de la gasolina recorre mayor distancia. En este caso se cancelan las ondas más largas, y aparecen diferentes colores.

F I G U R A 2 9 . 2 6

La película delgada de gasolina tiene

justo el grosor adecuado para cance-

El haz

lar las reflexiones de luz azul de las

reflejado se

superficies superior e inferior. Cuando

el haz incidente es luz blanca, los ojos

Haz

cancela por

ven amarillo. Si la película fuese más

incidente

interferencia;

delgada, tal vez se cancelaría el violeta

de luz azul

el ojo no ve luz

con una longitud de onda más corta.

(De nuevo, una onda se dibuja en negro

Onda reflejada desde la

para mostrar cómo está fuera de fase con

la onda azul después de la reflexión.)

Aire

superficie superior de gasolina

Gasolina

Onda transmitida

a través de la gasolina y reflejada

Agua

desde la superficie del agua

Los platos lavados en agua jabonosa y mal enjuagados tienen una delgada película de jabón sobre ellos. Sostén uno de estos platos hacia una fuente de luz, de modo que puedas ver los colores de interferencia. Luego gira el plato hacia una nueva posición, manteniendo la vista sobre la misma parte del plato, y el color cambiará. La luz que se refleja desde la superficie inferior de la película jabonosa transparente cancela la luz que se refleja desde la superficie superior de la película jabonosa. Las ondas de luz de distintas longitudes de onda se cancelan para diferentes ángulos. Los colores de interferencia se ven mejor en las pompas de jabón (Figura 29.27). Observarás que estos colores son predominantemente cian, magenta

F I G U R A 2 9 . 2 7

El magenta que se ve en las pompas de

y amarillo, debido a la sustracción de los pri-

jabón de Emily se debe a la cancelación

marios rojo, verde y azul, y otros colores de una

de la luz verde. ¿Qué color primario se

sola longitud de onda.

canceló para producir cian?

La interferencia ofrece una forma de medir

la longitud de onda de la luz y otra radiación

electromagnética. También posibilita la medi-

ción de distancias en extremo pequeñas con

gran exactitud. Los instrumentos llamados

interferómetros, que aplican el principio de la

VIDEO: Interferencia en las

interferencia, son los instrumentos más exactos

pompas de jabón

conocidos para medir distancias pequeñas.

PRACTICANDO LA FÍSICA

Realiza este experimento de física en el lavabo de tu cocina. Sumerge una taza para café de color oscuro (los colores oscuros constituyen el mejor fondo para ver los colores de interferencia) en detergente para trastes y luego sostenla de costado y observa la luz reflejada en la película jabonosa que cubre su boca. Colores arremolinados aparecerán a medida que el jabón baje para formar una cuña que se vuelve más gruesa en el fondo. El torbellino de colores parece corresponder a varios grosores de la delgada película jabonosa. La parte superior se vuelve más delgada, tan delgada que parece negra. Cualquiera sea su longitud de onda, la luz que se refleja en la superficie interior invierte su fase, vuelve a unirse a la luz que se refleja en la superficie exterior y se cancela. La película pronto se vuelve tan delgada que revienta.

29.5 Polarización

La interferencia y la difracción constituyen la mejor evidencia de que la luz es similar a una onda. Como aprendiste en el Capítulo 19, las ondas pueden ser longitudinales o transversales. Las ondas sonoras son longitudinales, lo cual significa que el movimiento vibratorio es a lo largo de la dirección en la que viaja la onda. Pero

cuando uno sacude una soga tensa, el movimiento vibratorio que viaja a lo largo de la soga es perpendicular, o transversal, a la soga. Tanto las ondas longitudinales como las transversales muestran efectos de interferencia y difracción. Entonces, ¿las ondas de luz son longitudinales o transversales?

La polarización de las ondas de luz demuestra que son transversales. Sólo las ondas F I G U R A 2 9. 2 8

transversales pueden polarizarse. Considera la soga tensa que se sacude en la Figu- Una onda plano-polarizada vertical-ra 29.28. Una onda transversal viaja a lo largo de la soga en un plano. Se dice que tal mente y una onda plano-polarizada onda está plano-polarizada o polarización planar,4 lo cual significa que las ondas que horizontalmente.

viajan a lo largo de la soga están confinadas a un solo plano. Si sacudes la soga hacia arriba y hacia abajo, produces una onda plano-polarizada verticalmente. Si la sacudes de lado a lado, produces una onda plano-polarizada horizontalmente.

Un solo electrón en vibración puede emitir una onda electromagnética que sea plano-polarizada. El plano de polarización coincidirá con la dirección de vibración del electrón y es el plano de vibración del campo eléctrico. Entonces, un electrón que acelera verticalmente emite luz que está polarizada verticalmente, en tanto que un electrón que acelera (a)

(b)

horizontalmente emite luz que está polarizada horizontalmente (Figura 29.29).

Una fuente de luz común (como una lámpara incandescente, una lámpara fluorescente o la llama de una vela) emite luz que no está polarizada. Esto se debe a que no hay una dirección de vibración preferida para los electrones en aceleración que emiten la luz.

Los planos de vibración pueden ser tan numerosos como los electrones en aceleración que los producen. En la Figura 29.30a se representan algunos planos. Todos estos planos pueden representarse con líneas radiales (Figura 29.30b) o, de manera m (a)

ás simple,

(b)

mediante vectores en dos direcciones perpendiculares entre sí (Figura 29.30c), como si todos los vectores de la Figura 29.30b se hubieran descompuesto en sus componentes F I G U R A 2 9 . 2 9

horizontales y verticales. Este esquema más simple representa luz no polarizada. La luz (a) Una onda plano-polarizada verticalmente de una carga que vibra verti-

polarizada se representaría mediante un solo vector.

calmente.

(b) Una onda plano-polarizada hori-

zontalmente de una carga que vibra

horizontalmente.

F I G U R A 2 9 . 3 0

Representaciones de ondas plano-

polarizadas. Las tres representaciones

muestran la parte eléctrica de la onda

(a)

(b)

(c)

electromagnética.

Todos los cristales transparentes que por naturaleza tengan una forma no cúbica tienen la propiedad de transmitir la luz con una polarización de manera diferente a la luz con otra polarización. Ciertos cristales5 no sólo dividen la luz no polarizada en dos haces internos polarizados en ángulos rectos entre sí, sino que también absorben intensamente un haz mientras transmiten el otro (Figura 29.31). La turmalina es uno de estos cristales comunes, pero, por desgracia, la luz transmitida tiene color. Sin embargo, la herapatita hace el trabajo sin decoloración. Cristales microscópicos de herapatita se incrustan entre hojas de celulosa en una alineación uniforme y se usan para fabricar filtros Polaroid. Algunas hojas Polaroid consisten en ciertas moléculas alineadas en lugar de pequeños cristales.6

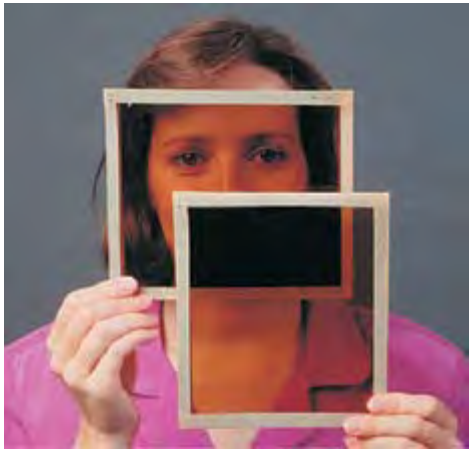
F I G U R A 2 9 . 3 1

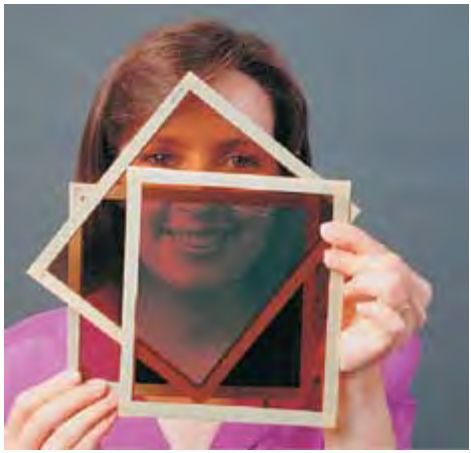
Si observas luz no polarizada a través de un filtro Polaroid, puedes girar el filtro en Un componente de la luz no polarizada cualquier dirección y la luz parecerá no cambiar. Pero si observas luz polarizada y giras incidente se absorbe, lo que resulta en una luz polarizada saliente.

4La luz también puede polarizarse de manera circular y elíptica, que son combinaciones de polarizaciones transversales. Pero no se estudiarán estos casos.

5Llamados dicroicos.

6Las moléculas son de yodo polimérico en una hoja de alcohol polivinílico o polivinileno.





556

PA R T E SEI S

LU Z

F I G U R A 2 9 . 3 2

La luz no polarizada vibra en todas direcciones

La analogía de la soga ilustra el efecto de

Componentes horizontal y vertical

los Polaroid cruzados.

El componente vertical pasa a

través del primer polarizador…

…y el segundo

El componente vertical

no pasa a través de este

segundo polarizador

(a)

(b)

el filtro, progresivamente puedes cortar más y más luz hasta que ésta se bloquee por completo. Un Polaroid ideal transmitirá 50% de la luz incidente no polarizada. Desde luego, este 50% está polarizado. Cuando dos Polaroid se colocan de modo que sus ejes de polarización están alineados, la luz se transmitirá a través de ambos (Figura 29.32a).

SCREENCAST: Polarización de la luz

Si sus ejes están en ángulos rectos entre sí (en este caso se dice que los filtros están cruzados), no penetra luz en el par (Figura 29.32b). (En realidad, algo de luz con las longitudes de onda más cortas logra pasar, mas no en grado significativo.) Cuando se utilizan Polaroid en pares como éste, al primero se le llama polarizador y al segundo se le llama analizador.7

Mucha de la luz reflejada en las superficies no metálicas está polarizada. El destello del vidrio o del agua es un buen ejemplo. Excepto por el caso de una incidencia perpendicular, el rayo reflejado contiene más vibraciones paralelas a la superficie reflectora, en tanto que el haz transmitido contiene más vibraciones en ángulo recto con las vibraciones de la luz reflejada (Figura 29.35). Esto es análogo a lanzar rocas planas sobre la superficie de un estanque. Cuando las rocas golpean con sus caras paralelas a la Luz reflejada

superficie, se reflejan fácilmente, pero si golpean con sus caras inclinadas a la superficie, Luz incidente

se "refractan" hacia el agua. El destello de las superficies reflectoras puede disminuir mucho con el uso de gafas Polaroid. Los ejes de polarización de las gafas son verticales Luz

porque la mayor parte de los destellos se reflejan de superficies horizontales.

refractada

Luz

transmitida

F I G U R A 2 9 . 3 3

La mayor parte del destello proveniente

de superficies no metálicas está polari-

zado. Observa cómo los componentes de

la luz incidente paralelos a la superficie

se reflejan y cómo los componentes

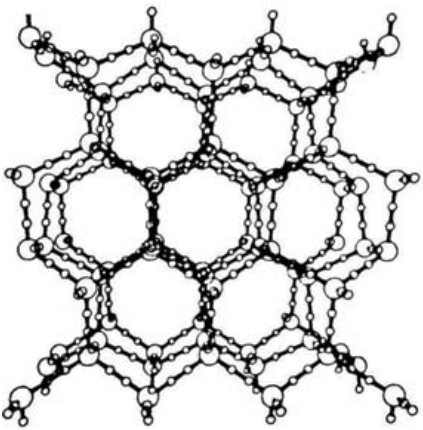
perpendiculares a la superficie pasan a

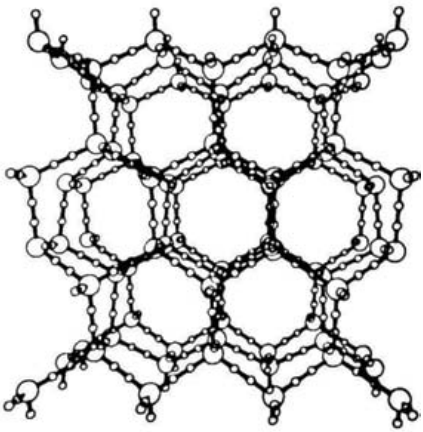
F I G U R A 2 9 . 3 4

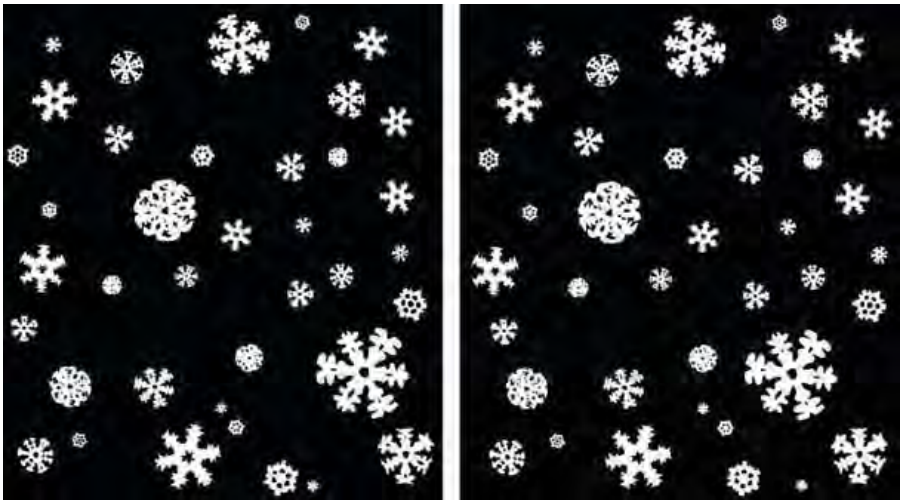
través de la superficie hacia el medio.

La luz se transmite cuando los ejes de los Polaroid están alineados (a), pero se absorbe cuando Ludmila gira uno de modo que los ejes estén en ángulo recto uno con respecto al otro (b). Cuando ella inserta un tercer Polaroid en ángulo entre los Polaroid cruzados, la luz se transmite de nuevo (c). ¿Por qué? (Para conocer la respuesta, después de que la hayas razonado un poco, consulta el Apéndice D, "Aplicaciones de los vectores".)

7En un filtro Polaroid común, moléculas de cadena larga se orientan con sus ejes perpendiculares al eje de polarización, y preferentemente absorben (en lugar de transmitir) luz polarizada a lo largo de su longitud, en forma muy parecida a como una antena absorbe ondas de radio. Dichos filtros están en contraste con la analogía de la soga a través de la ventana de la Figura 29.32. Para cualquier tipo de filtro, lo que hay que aprender es que los componentes transmitido y absorbido de la onda están en ángulo recto uno con respecto al otro.







C A PÍ T U LO 29 O N DA S D E LU Z

557

P U N T O D E C O N T R O L

¿Cuál par de gafas es más adecuada para los conductores de automóviles?

(Los ejes de polarización se muestran con las líneas rectas.)

(a)

(b)

(c)

F I G U R A 2 9 . 3 5

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Las gafas Polaroid bloquean la luz que

Las gafas (a) son las más adecuadas porque el eje vertical bloquea la luz polarizada vibra horizontalmente. Cuando las gafas

horizontalmente, lo que constituye la mayoría de los destellos de las superficies hori-se traslapan en ángulo recto, no pasa luz.

zontales. Las gafas (c) son adecuadas para ver películas 3D.

Visualización tridimensional

La visión en tres dimensiones depende principalmente del hecho de que ambos ojos proporcionan sus impresiones de manera simultánea (o casi) y cada ojo ve la escena La polarización ocurre sólo con

desde un ángulo un poco diferente. Esto es paralaje, que es evidente cuando ves un dedo ondas transversales. De hecho, es

una forma importante de determi-

vertical a la distancia de tu brazo y ves cómo parece cambiar de posición de izquierda a nar si una onda es transversal o

derecha conforme cierras cada ojo de forma alternada. Con ambos ojos abiertos tiendes longitudinal.

a ver un poco "alrededor" de tu dedo. Si ves el par de dibujos de la Figura 29.36 en tal forma que el ojo izquierdo observe la imagen izquierda al tiempo que el derecho observa la imagen derecha, verás una imagen estereográfica con profundidad. Los dibujos ilustran una visión estereográfica de la estructura cristalina del hielo.

Los copos de nieve que aparecen en un solo plano en el par de dibujos de la Figura 29.37 se ven en diferentes planos cuando se ven estereoscópicamente.

F I G U R A 2 9 . 3 6

La estructura cristalina del hielo en

estéreo. Verás profundidad cuando tu

cerebro combine las visiones del ojo

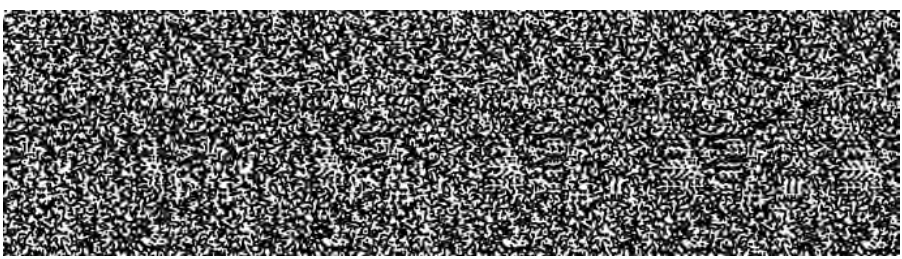
izquierdo que observa la figura izquierda

y el ojo derecho que observa la figura derecha. Para lograr esto, enfoca tus ojos para visión distante antes de observar esta página. Sin cambiar tu foco, observa la página y cada figura parecerá doble. Luego ajusta tu foco de modo que las dos imágenes internas se traslapen para formar una imagen compuesta central. La práctica hace al maestro. (Si en vez de ello cruzas los ojos para traslapar las figuras, ¡lo cercano y lo lejano se invierten!)

VIDEO: Luz polarizada y visión 3D

F I G U R A 2 9 . 3 7

Visión estereoscópica de copos de nieve. Observa estas figuras de la misma manera que la Figura 29.36.



El visor estereoscópico portátil, familiar para tus abuelos (Figura 29.38), simula el efecto de profundidad. En este dispositivo hay dos transparencias fotográficas (o diapositivas) tomadas desde posiciones un poco diferentes. Cuando se ven al mismo tiempo, el arreglo es tal que el ojo izquierdo ve la escena como fotografiada desde la izquierda, y el ojo derecho la ve como fotografiada desde la derecha. Como resultado, los objetos de la escena se hunden en bajorrelieve en la perspectiva correcta, lo que produce la profundidad aparente de la imagen. El dispositivo se construye de modo que cada ojo ve sólo la vista adecuada. No hay ninguna posibilidad de que un ojo vea ambas vistas. Si F I G U R A 2 9 . 3 8

retiras las diapositivas del visor y proyectas cada vista sobre una pantalla con un proyec-Un visor estereoscópico.

tor de diapositivas (de modo que las vistas se superpongan), resulta una imagen borrosa.

F I G U R A 2 9 . 3 9

La prueba de todo conocimiento

La prueba de todo conocimiento

Con tus ojos enfocados para ver de lejos,

es el experimento.

es el experimento.

la segunda y la cuarta líneas parecen

El experimento es el único juez

El experimento es el único juez

estar más alejadas; si cruzas los ojos, la

segunda y la cuarta líneas parecen estar

de la “verdad” científica.

de la “verdad” científica.

más cerca.

Richard P. Feynman

Richard P. Feynman

Esto se debe a que cada ojo ve ambas vistas al mismo tiempo. Aquí es donde intervienen los filtros Polaroid. Si colocas los Polaroid enfrente de los proyectores, de modo que estén en ángulo recto uno con respecto al otro, y ves la imagen polarizada con unas gafas polarizadas en la misma orientación, cada ojo verá la vista adecuada como con el visor estereoscópico (Figura 29.39). Entonces verás una imagen en tres dimensiones.

Pantalla

metálica

Polaroid

Polaroid

alineados

alineados

horizontalmente

verticalmente

Proyector de

diapositivas

F I G U R A 2 9 . 4 0

Un programa 3D que utiliza Polaroid. El ojo izquierdo sólo ve luz polarizada del proyector izquierdo, el ojo derecho sólo ve luz polarizada del proyector derecho, y ambas vistas se fusionan en el cerebro para producir profundidad.

La profundidad también se observa en los estereogramas generados por computadora, como en la Figura 29.41. Aquí, los patrones un poco diferentes no son evidentes en una vista casual. Usa el procedimiento para ver las figuras estereoscópicas anteriores.

Espera la autoestereoscopia: 3D sin

Una vez que domines la técnica de visualización, dirígete al supermercado local y com-gafas Polaroid. El sistema se basa

prueba la variedad de estereogramas en pósteres y libros.

en lentes lenticulares que pro-

yectan una imagen ligeramente

diferente a cada ojo, lo que crea la

ilusión de profundidad.

F I G U R A 2 9 . 4 1

Estereograma generado por

computadora.

C A PÍ T U LO 29 R E V ISI Ó N

559

29.6 Holografía

Acaso la ilustración más divertida de la interferencia sea el hologrAma, una placa foto-Los elementos ópticos holográficos

gráfica bidimensional producida con luz láser que te permite ver una reproducción fiel que parecen flotar enfrente del

de una escena en tres dimensiones. El holograma lo inventó y nombró Dennis Gabor parabrisas de una aeronave ayudan a

en 1947, 10 años antes de que se inventaran los láseres. En griego, holo significa “todo”

los pilotos en la navegación. Lo mis-

mo se presenta en algunos modelos

y grama significa “mensaje” o “información”. Por tanto, un hologrAma contiene todo de automóviles. Los médicos utilizan

el mensaje o la imagen completa. Con iluminación adecuada, la imagen es tan realista escaneos holográficos 3D para hacer

que en verdad puedes ver alrededor de las esquinas de los objetos en la imagen y ver mediciones sin cirugía invasiva. La

los costados.

lista de aplicaciones crece. ¡Espera en

En la fotografía ordinaria, se usa una lente para formar una imagen. La luz reflejada tu futuro una televisión holográfica!

en cada punto del objeto se dirige mediante la lente sólo hacia un punto correspondiente sobre la película o fotorreceptor. Sin embargo, en el caso de la holografía, no se usan lentes formadoras de imagen. En vez de ello, cada punto del objeto que se va a "fotografiar" refleja luz hacia toda la placa fotográfica, de modo que cada parte de la placa se expone con luz reflejada en cada región del objeto. Es importante que la luz usada para formar un holograma sea de una sola frecuencia y que todas las partes estén exactamente en fase: debe ser coherente. Si, por ejemplo, se usara luz blanca, las franjas de difracción para una frecuencia impedirían ver con claridad las de las demás frecuencias.

Sólo un láser puede producir fácilmente tal luz. (En el Capítulo 30 se tratarán los láseres a detalle.) Los hologramas se hacen con luz láser, pero pueden verse con luz regular, como lo demuestra el holograma de tu tarjeta de crédito o de algunos tipos de dinero.

La luz es verdaderamente fascinante, en especial cuando se difracta en las franjas de interferencia de un holograma. Busca en Internet información detallada sobre los hologramas.

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)
Principio de Huygens. Cada punto en un frente de onda

constructiva resulta del reforzamiento de una cresta con otra

puede considerarse como la fuente de pequeñas ondas secun-

cresta; la interferencia destructiva resulta de la cancelación

darias que se dispersan en todas direcciones con una rapidez

de una cresta con un val e. La interferencia de longitudes de

igual a la rapidez de propagación de las ondas.

onda seleccionadas de la luz produce colores conocidos como

Difracción. El doblado de la luz que pasa cerca del borde de un colores de interferencia.

objeto o a través de una rendija estrecha, que hace que la luz

Polarización. El alineamiento de las vibraciones eléctricas

se disperse.

transversales de radiación electromagnética. Se dice que tales

Superposición. El traslape y combinación de ondas.

ondas con vibraciones alineadas están polarizadas.

Interferencia. El resultado de superponer diferentes ondas, por
Holograma. Patrón de interferencia microscópica bidimensio-lo
general con la misma longitud de onda. La interferencia

nal que muestra imágenes ópticas tridimensionales.

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N
) 29.1 Principio de Huygens

5. ¿Cuál se difracta con más facilidad alrededor de los

1. De acuerdo con Huygens, ¿cómo se comporta cada punto

edificios: las ondas de radio AM o las de FM? ¿Por qué?

sobre un frente de onda?

29.3 Superposición e interferencia

2. ¿Las ondas planas incidentes sobre una pequeña abertura

en una barrera formarán un abanico en el otro lado o

6. ¿La interferencia se limita sólo a algunos tipos de ondas u

seguirán como ondas planas?

ocurre para todo tipo de ondas?

7. ¿Qué aspecto de la luz demostró Thomas Young en su

29.2 Difracción

famoso experimento con luz?

3. ¿La difracción es más pronunciada a través de una

abertura pequeña o a través de una abertura grande?

29.4 Interferencia en películas delgadas

4. Para una abertura de un tamaño dado, ¿la difracción es

8. ¿Qué explican las bandas claras y oscuras que se produ-

más pronunciada para una longitud de onda más grande

cen cuando luz monocromática se refleja en una placa de

o para una longitud de onda más corta?

vidrio que se encuentra encima de otra placa de vidrio?

9. ¿Qué se entiende cuando se dice que una superficie es

17. ¿Por qué la luz pasará a través de un par de Polaroid

ópticamente plana?

cuando los ejes estén alineados, pero no cuando los ejes

10. ¿Cuál es la causa de los anillos de Newton?

estén en ángulo recto uno con respecto al otro?

11. ¿Qué es lo que produce la iridiscencia?

18. ¿Cuánta luz ordinaria transmitirá un Polaroid ideal?

12. ¿Qué es lo que produce el espectro de colores que se ve en

19. Cuando luz ordinaria incide en un ángulo oblicuo sobre

las manchas de gasolina sobre una calle mojada? ¿Por qué

el agua, ¿qué puedes decir acerca de la luz reflejada?

estas manchas no se ven en una calle seca?

20. ¿El paralaje es evidente cuando cierras un ojo?

13. ¿Qué es lo que explica los diferentes colores de las pom-

21. ¿El paralaje subyace a la profundidad percibida en las

pas de jabón o de una capa de gasolina sobre agua?

imágenes estereográficas?

14. ¿Por qué los colores de interferencia principalmente son

22. ¿El observador percibiría profundidad si las imágenes

cian, magenta y amarillo?

proyectadas en la Figura 29.40 fuesen idénticas?

29.5 Polarización

23. ¿Qué función tienen los filtros de polarización en la

proyección 3D?

15. ¿Qué fenómeno distingue las ondas longitudinales de las

ondas transversales?

29.6 Holografía

16. ¿Cómo se compara la dirección de la polarización de la luz

24. ¿Cómo difiere un holograma de una fotografía

con la dirección de vibración del electrón que lo produce?

convencional?

P I E N S A Y R E A L I Z A (A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 25. Con una navaja de rasurar, corta una rendija en una tarla intensidad del destello cambia a medida que varías la

jeta y observa una fuente de luz a través de ella. Puedes

magnitud del componente del vector eléctrico alineado

variar el tamaño de la abertura si doblas un poco la tar-

con el eje de polarización de las gafas. Observa también

jeta. ¿Ves las franjas de interferencia? Intenta este experi-

la polarización de diferentes partes del cielo cuando sos-

mento con dos rendijas poco espaciadas.

tengas las gafas en tu mano y las gires.

26. La próxima vez que estés en la tina, haz espuma y

28. Coloca una fuente de luz blanca sobre una mesa frente

observa los colores de los destellos producidos por la luz

a ti. Luego coloca una hoja de Polaroid enfrente de la

que ilumina a cada pequeña burbuja. Observa que dife-

fuente, una botella de jarabe de maíz enfrente de la hoja

rentes burbujas reflejan distintos colores, debido a los

y una segunda hoja de Polaroid enfrente de la botella.

diferentes grosores de la película jabonosa. Si un amigo

Mira a través de las hojas

se baña contigo, compara los diferentes colores que cada

Polaroid que forman un

uno ve reflejados en las mismas burbujas. Verás que son

emparedado con el jarabe y

diferentes: ¡lo que ves depende de tu punto de vista!

verás colores espectaculares

27. Cuando uses gafas Polaroid, observa el destello de una

conforme giras una de las

superficie no metálica, como un camino o un cuerpo de

hojas.

agua. Inclina la cabeza de lado a lado y observa cómo

P I E N S A Y E X P L I C A (S Í N T E S I S)

29. ¿Por qué la luz solar que ilumina la Tierra puede aproxi-

35. Un arreglo de doble rendija produce franjas de interferencia

marse mediante ondas planas, en tanto que la luz de una

para luz de sodio amarilla. ¿Debería usarse luz roja o luz

lámpara cercana no puede aproximarse de esta forma?

azul para producir franjas con un menor espaciamiento?

30. En tu entorno cotidiano, la difracción es mucho más

36. Cuando la trayectoria reflejada en una superficie de una

evidente para las ondas sonoras que para las ondas lumi-

película delgada difiere en una longitud de onda completa

nosas. ¿Por qué esto es así?

de la trayectoria reflejada en la otra superficie y no ocurre

31. ¿Por qué las ondas de radio se difractan alrededor de los

un cambio de fase, ¿el resultado será interferencia destruc-

edificios, pero las ondas de luz no lo hacen?

tiva o interferencia constructiva?

32. ¿En qué se parecen las franjas de interferencia de la luz

37. Cuando la trayectoria reflejada en una superficie de una

a la intensidad variable que escuchas mientras caminas

película delgada difiere media longitud de onda de la

junto a un par de bocinas que emiten el mismo sonido?

trayectoria reflejada en la otra superficie y no ocurre un

33. ¿En cuánto deben diferir en distancia recorrida un par

cambio de fase, ¿el resultado será interferencia destructiva

de rayos de luz provenientes de una fuente común para

o interferencia constructiva?

producir interferencia destructiva?

38. Supón que colocas una rejilla de difracción enfrente del

34. La luz ilumina dos rendijas delgadas poco espaciadas

lente de una cámara y tomas una fotografía del alumbrado

entre sí y producen un patrón de interferencia sobre una

público de una calle. ¿Qué esperarías ver en tu fotografía?

pantalla que está detrás de ellas. ¿Para cuál color de luz,

39. ¿Qué ocurre con la distancia entre las franjas de interfe-

amarillo o verde, la distancia entre las franjas será mayor?

rencia si la separación entre las dos rendijas aumenta?

C A PÍ T U LO 29 R E V ISI Ó N

561

40. ¿Por qué el experimento de Young es más efectivo con

51. La luz polarizada es parte de la naturaleza, pero el sonido

rendijas que con los orificios puntuales que usó primero?

polarizado no lo es. ¿Por qué?

41. ¿En cuál de éstos se forma color mediante refracción: péta-

52. ¿Por qué un filtro Polaroid ideal transmitirá 50% de la

los de flor, arcoíris, pompas de jabón? ¿Mediante reflexión

luz no polarizada incidente?

selectiva? ¿Mediante interferencia en películas delgadas?

53. ¿Por qué un filtro Polaroid ideal puede transmitir de cero

42. Los colores de los pavos reales y los colibríes son el resul-

a 100% de la luz polarizada incidente?

tado no de pigmentos sino de crestas en las capas superfi-

54. ¿Qué porcentaje de luz se transmite mediante dos Polaciales de sus plumas. ¿Mediante cuál principio físico estas
roid ideales, uno encima del otro, con sus ejes de polari-
crestas producen colores?
zación alineados? ¿Con sus ejes en ángulos rectos uno con
43. Las alas coloridas de muchas mariposas se deben a pig-
respecto al otro?
mentación, pero en otras, como en la mariposa Morpho,
55. ¿Cómo puedes determinar el eje de polarización para una
los colores no resultan de pigmentación alguna. Cuando
sola hoja de Polaroid (en especial si estás a la orilla de un
el ala se ve desde diferentes ángulos, los colores cambian.
lago)?
¿Cómo se producen estos colores?
56. ¿Por qué las gafas Polaroid reducen el destello, en tanto
44. ¿Por qué los colores iridiscentes vistos en algunas conchas
que las gafas no polarizadas simplemente recortan la can-
marinas (como las conchas de abulón) cambian cuando
tidad total de luz que llega a los ojos?
las conchas se ven desde varias posiciones?
57. Para retirar el destello de la luz proveniente de un suelo
45. Cuando los platos no se enjuagan bien después de lavarse,
pulido, ¿el eje de un filtro Polaroid debería ser horizontal
diferentes colores se reflejan de sus superficies. Explica.

o vertical?

46. ¿Por qué los colores de interferencia son más evidentes en

58. La mayor parte del destello proveniente de las superficies

películas delgadas que en películas gruesas?

no metálicas es polarizado, con el eje de polarización

47. ¿La luz proveniente de dos estrellas muy cercanas produ-

paralelo al eje de la superficie reflectora. ¿Esperarías que

cirá un patrón de interferencia? Explica.

el eje de polarización de unas gafas Polaroid fuera hori-

48. Si observas los patrones de interferencia de una película

zontal o vertical? ¿Por qué?

delgada de aceite o gasolina sobre agua, verás que los colo-

59. ¿De qué manera una sola hoja de película Polaroid puede

res forman anillos completos. ¿En qué son similares estos

servir para mostrar que el cielo está parcialmente pola-

anillos a las líneas de igual elevación sobre un mapa de

rizado? (Es muy interesante que, a diferencia de los seres

contorno?

humanos, las abejas y muchos insectos pueden discernir

49. Debido a la interferencia de ondas, una película de aceite

la luz polarizada y aprovechar esta habilidad para su

sobre agua en la luz solar se ve amarilla para los observado-

navegación.)

res directamente arriba en un aeroplano. ¿Qué color de luz

60. ¿Por qué la holografía práctica tuvo que esperar la llegada

se transmite a través del aceite (que vería un buzo directa-

del láser?

mente bajo ella)?

61. ¿Cuál de éstos es más importante para la holografía:

50. Para el telescopio Hubble, ¿cuál luz (roja, verde, azul o

interferencia, reflexión selectiva, refracción o todos ellos?

ultravioleta) es mejor para ver detalles finos de objetos

astronómicos distantes?

P I E N S A Y D I S C U T E (E V A L U A C I Ó N)

62. Cuando la luz blanca se difracta al pasar por una rendija

66. ¿Cuál producirá franjas de luz con un espaciamiento más

delgada, como en la Figura 29.8b, diferentes componentes

ancho cuando pasen por una rejilla de difracción: la luz

de colores se difractan en distintas cantidades de modo que

proveniente de un láser rojo o la luz proveniente de un

un arcoíris de colores aparece en el borde del patrón. ¿Cuál

láser verde?

color se difracta a través del ángulo más grande? ¿Cuál color

67. Las pantallas digitales de los relojes y otros dispositivos

a través del ángulo más pequeño?

suelen estar polarizadas. ¿Qué problema relacionado

63. ¿Cuál producirá franjas con un espaciado más ancho en

puede ocurrir cuando usas gafas Polaroid?

un experimento de doble rendija: la luz roja o la luz viole-

68. La luz no pasará a través de un par de hojas Polaroid

ta? (Deja que la Figura 29.18 guíe tu razonamiento.)

cuando estén alineadas perpendicularmente. Sin embar-

64. ¿Cuál producirá franjas con un espaciado más ancho: un

go, si un tercer Polaroid se empareda entre las dos con su

experimento de doble rendija en aire o en agua? (Deja

alineación a la mitad entre los alineamientos de las otras

que la Figura 29.18 guíe tu razonamiento.)

dos (esto es, con su eje formando un ángulo de 45° con

65. Si la diferencia en la longitud de la trayectoria entre dos

cada uno de los otros dos ejes de alineamiento, como en

haces idénticos y coherentes es de dos longitudes de onda

la Figura 29.34), parte de la luz pasará a través de ellos.

cuando llegan a una pantalla, ¿producirán una mancha

¿Por qué?

oscura o una clara?

MALL
ROAD

30 12

C A P Í T U L O 3 0

Emisión de luz

3

30.1 Emisión de luz

30.2 Excitación

30.3 Espectros de emisión

4

30.4 Incandescencia

30.5 Espectros de absorción

30.6 Fluorescencia

30.7 Fosforescencia

30.8 Lámparas

30.9 Láseres

5

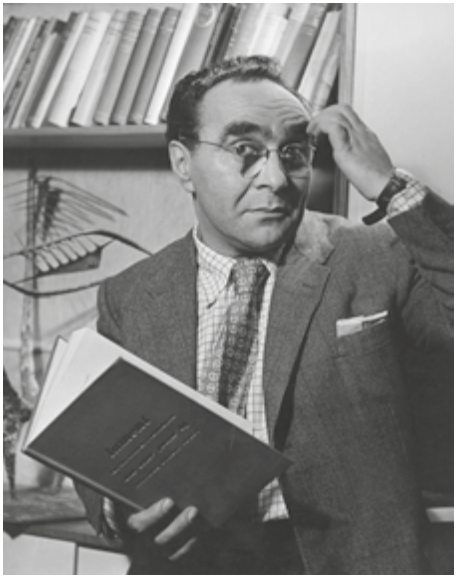
1 George Curtis separa luz de una fuente de argón en las

frecuencias que la componen con un espectroscopio. 2 Palabras sabias de Neil deGrasse Tyson: “La característica extraordinaria

de las leyes de la física es que se aplican en todas partes, ya sea

que elijas creer en ellas o no. Fuera de las leyes de la física, todo lo demás es opinión.” 3 Evan Jones apunta hacia un uso extenso de los diodos emisores de luz (LED) en un tablero cerca de su universidad. 4 Los LED están dispuestos en series de los tres colores primarios aditivos: rojo, verde y azul. Todos los colores del arcoíris se activan cuando se encienden diversas combinaciones de LED.

5 Los estudiantes de física de la Universidad Lund de Suecia son agasajados con un espectáculo láser cada semestre.



C A PÍ T U LO 3 0 EM ISI Ó N DE LU Z

563

Hace unos 40 años, Jacob Bronowski era un vocero ocupar otros destacados pues-mundial de la ciencia. Su libro y serie de televisión,

tos académicos, Tyson fue

The Ascent of Man (El ascenso del hombre), fueron

nombrado director del Pla-

fuente de inspiración para este autor y para mil ones de per-

netario Hayden que lo había

sonas más. Luego llegó Carl Sagan, astrónomo, astrofísico,

impresionado en su infancia.

cosmólogo y autor de más de 20 libros, que inspiró todavía

Ahí adquirió notoriedad por

a más personas con su serie de

encabezar la degradación de

televisión Cosmos: A Personal Plutón al estatus de planeta Voyage (Cosmos). Sagan ense-enano, lo cual, sorprenden-

ñó bel amente que la ciencia es

temente, fue un movimiento

más importante como forma poco popular, con hordas de

de razonamiento que como escolares que hicieron cam-

cuerpo de conocimiento.

paña para "Salvar a Plutón". Neil deGrasse Tyson

Luego vino Neil deGras-

Quizás Neil es mejor conoci-

se Tyson, quien a los 9 años do por sus apariciones en la televisión PBS, en particular en de edad visitó el Planetario NOVA Science Now, su secuela a la serie de televisión Cosmos Hayden en la ciudad de Nueva

de Sagan, y su programa de radio, StarTalk Radio. En el

York. Al igual que Sagan, quien

espíritu de Bronowski y Sagan, Tyson continúa informando

Jacob Bronowski

había ido ahí de niño, Tyson a mil ones sobre las maravil as, la bel eza y la importancia de quedó fascinado con la ciencia

la ciencia, centrado más en cómo pensar que en qué pensar.

y particularmente intrigado

La respuesta de Tyson cuando se le pregunta sobre la vida

con la astronomía. Su obsesión

diaria: "El problema, con frecuencia no descubierto sino

con la astronomía creció y, a hasta tarde en la vida, es que, cuando buscas cosas como el los 15 años de edad compartió

amor, el significado, la motivación, resulta que se encuen-

su emoción con otros al ofre-

tran detrás de un árbol o debajo de una roca. Las personas

cer conferencias públicas sobre

con más éxito en la vida reconocen que el os crean su propio

astronomía. Después, cuando amor, construyen su propio significado, generan su propia Tyson solicitó su ingreso a la motivación. En mi caso, mi motor son dos filosofías prin-Cornell University, su solici-

cipales: saber más hoy del mundo de lo que sabía ayer. Y

tud, que desbordaba pasión aliviar el sufrimiento de los demás. Te sorprendería saber por el estudio y la investiga-cuán lejos te lleva eso." ¡Busca en Internet y conoce más de

ción del universo, llamó la este carismático vocero de la ciencia!

Carl Sagan

atención de Sagan, quien se

Como astrofísico, para estudiar las estrel as Tyson se

puso en contacto con el joven

basó en la luz que emiten. Este capítulo examina la emisión

Tyson y lo motivó. Aunque Tyson decidió asistir a Har-

de luz, que es tan fascinante para los astrónomos, los físicos

vard, Sagan siguió siendo un buen mentor. Después de y, espero, para ti también.

30.1 Emisión de luz

Si bombeas energía al interior de una antena metálica de tal forma que ésta haga que los electrones libres vibren unos cientos de miles de veces por segundo, se emite una onda de radio. Si los electrones libres pudieran vibrar en el orden de un trillón de veces por segundo, se emitiría una onda de luz visible. Pero la luz no se produce en las antenas metálicas, ni la producen de manera exclusiva antenas atómicas mediante oscilaciones de electrones en los átomos, como se estudió en capítulos anteriores. En este capítulo estudiarás la física de las fuentes de luz -de la emisión de luz.

Los detalles de la emisión de luz procedente de los átomos suponen transiciones de electrones de estados de energía más altos a estados más bajos en el interior del átomo.

Este proceso de emisión puede entenderse en términos del conocido modelo planetario

del átomo que se estudió en el Capítulo 11. Así como cada elemento se caracteriza por el número de electrones que ocupan las capas que rodean su núcleo atómico, cada elemento posee su propio patrón característico de capas electrónicas, o estados energéticos. Estos estados se encuentran sólo con ciertas energías; se dice que son discretos.

A estos estados discretos se les conoce como estados cuánticos, y regresarás a ellos con detalle en los siguientes dos capítulos. Por ahora, céntrate sólo en su importancia en la emisión de luz.

F I G U R A 3 0 . 1

Vista simplificada de los electrones que

30.2

orbitan en capas discretas alrededor del

Excitación

núcleo de un átomo.

Un electrón alejado del núcleo tiene mayor energía potencial eléctrica con respecto al núcleo que un electrón más cerca del núcleo. Se dice que el electrón más distante está en un estado de energía más alto o, lo que es lo mismo, en un nivel de energía más alto.

En cierto sentido, esto es similar a la energía de una puerta de resorte o un martinete.

Cuanto más se abra la puerta, mayor será su energía potencial de resorte; cuanto más alto se eleve el ariete del martinete, mayor será su energía potencial gravitacional.

Cuando un electrón de alguna forma se eleva a un nivel energético más alto, se dice que el átomo está excitado. Sin embargo, la posición más alta del electrón sólo es momentánea: al igual que la puerta de resorte abierta, pronto regresa a su estado energético más bajo. El átomo pierde su energía temporal adquirida cuando el electrón regresa a un nivel más bajo y emite energía radiante. El átomo experimenta los procesos de excitación y desexcitación.

Fotón

F I G U R A 3 0 . 2

Cuando un electrón de un átomo se

eleva a una órbita más alta, el átomo está

excitado. Cuando el electrón regresa a su

órbita original, el átomo se desexcita y

emite un fotón de luz.

Así como cada elemento eléctricamente neutro tiene su propio número de electrones, cada elemento también tiene su propio conjunto característico de niveles de energía. Los electrones que descienden de niveles de energía más altos a niveles más bajos
SCREENCAST: Excitación atómica

en un átomo excitado emiten con cada salto un pulso palpitante de radiación electromagnética llamada fotón, cuya frecuencia se relaciona con la transición de energía del salto. A este fotón se le considera como un corpúsculo localizado de energía pura, una

"partícula" de luz, que se expulsa del átomo. La frecuencia del fotón es directamente proporcional a su energía. En notación abreviada,

E ~ f

Todo en la naturaleza está

Cuando se introduce la constante de proporcionalidad h, esto se convierte en la ecua-conectado. Incluso las islas

ción exacta

están conectadas por debajo.

E 5 hf

donde h es la constante de Planck (en el siguiente capítulo estudiarás más de esto).

Un fotón de un haz de luz roja, por ejemplo, transporta una cantidad de energía que corresponde a su frecuencia. Otro fotón con el doble de frecuencia tiene el doble de energía y se encuentra en la parte

ultravioleta del espectro. Si muchos átomos de un material se excitan, se emiten muchos fotones con muchas frecuencias que corresponden

a los muchos diferentes niveles excitados. Estas frecuencias corresponden a colores característicos de luz proveniente de cada elemento químico.

La luz emitida en los tubos de vidrio de los anuncios publicitarios es una consecuencia conocida de la excitación. Los diferentes colores del anuncio corresponden a la excitación de diferentes gases, aunque es común referirse a cualquiera de ellos como

"neón". Sólo la luz roja es la del neón. En los extremos del tubo de vidrio que contiene el gas neón hay electrodos. Los electrones son desprendidos de estos electrodos y empujados de ida y vuelta a grandes rapideces por un alto voltaje CA. Millones de electrones con alta rapidez vibran de ida y vuelta dentro del tubo de vidrio y chocan con millones de átomos blanco; esto hace que los electrones en sus orbitales se eleven hacia niveles de energía más altos gracias a una cantidad de energía igual a la energía cinética perdida por el electrón que bombardea. Esta energía luego se irradia como la característica luz roja del neón cuando los electrones caen de vuelta a sus órbitas estables (hacia sus estados base). El proceso ocurre y vuelve a ocurrir muchas veces, ya que los átomos de neón experimentan de manera continua un ciclo de excitación y desexcitación. El resultado global de este proceso es la transformación de la energía eléctrica en energía radiante.

Los colores de varias flamas se deben a la excitación. Diferentes átomos de la flama emiten colores característicos del espaciamiento de sus niveles de energía. La sal de mesa común colocada en una flama, por ejemplo, produce el amarillo característico del sodio. Todo elemento, excitado en una flama u otra cosa, emite su propio color, o colores, característicos.

Las lámparas del alumbrado público constituyen otro ejemplo. Las calles de la ciudad se iluminan con luz emitida por gases como el vapor de mercurio. La luz proveniente de estas lámparas es rica en azules y violetas y, por tanto, es un "blanco"

diferente al de la luz de las antiguas lámparas incandescentes. Casi

todas las lámparas de las calles utilizan el brillo del gas sodio, que consume menos energía. Las lámparas de vapor de sodio a baja presión tienen un tinte anaranjado-amarillo. Pregunta a tu instructor si tiene un prisma o rejilla de difracción de repuesto que te pueda prestar.

Mira a través del prisma o la rejilla la luz de las lámparas de la calle y observa lo discreto de los colores, lo cual indica lo discreto de los niveles atómicos. Observa los diferentes colores de las lámparas de mercurio y de sodio.

La excitación se ilustra en las auroras boreales y australes. Partículas cargadas con gran rapidez que se originan en el viento solar golpean los átomos y las moléculas en la atmósfera superior. Emiten luz exactamente como ocurre en un tubo de neón. Los diferentes colores de la aurora corresponden a la excitación de diferentes gases: los átomos de oxígeno producen un color verdoso-blanco, las moléculas de nitrógeno producen rojo-violeta y los iones de nitrógeno producen azul-violeta. Las emisiones aurorales no se restringen a la luz visible; también incluyen radiación infrarroja, ultravioleta y de rayos X.

F I G U R E 3 0 . 3

Sólo la mecánica cuántica permite describir con exactitud el proceso excitación/ Excitación y desexcitación.

desexcitación. Si intentas ver el proceso en términos de física clásica, te toparás con contradicciones. De manera clásica, una carga eléctrica que acelera produce radiación electromagnética. ¿Esto explica que los átomos excitados emitan luz? Un electrón sí acelera cuando transita de un nivel de energía más alto a uno más bajo. Tal como los planetas interiores del sistema solar tienen mayores rapideces orbitales que los que se encuentran en órbitas más externas, los electrones en las órbitas más internas del Excitar un átomo es como intentar

átomo tienen mayores rapideces. Un electrón gana rapidez cuando cae a niveles de sacar a patadas una pelota de

energía más bajos. Bien, -¡el electrón que acelera radia un fotón! Pero no tan bien una zanja. Con muchas patadas

-el electrón experimenta de manera continua aceleración (aceleración centrípeta) en cortas no podrás sacarla, porque

la bola seguirá cayendo una y otra

cualquier órbita, ya sea que cambie o no de niveles de energía. De acuerdo con la física vez. Una patada con la cantidad

clásica, debería radiar energía de manera continua. Pero no lo hace. Todos los intentos correcta de energía es suficiente

por explicar la emisión de luz de un átomo excitado en términos de un modelo clásico para sacar la bola de la zanja. Lo

han sido infructuosos. Sólo se dirá que la luz se emite cuando un electrón de un átomo mismo ocurre con la excitación de

realiza un "salto cuántico" de un nivel de energía más alto a uno más bajo y que la los átomos.

energía y la frecuencia del fotón emitido se describen mediante E 5 hf.

P U N T O D E C O N T R O L

Supón que un amigo sugiere que, para un excelente funcionamiento, los átomos de neón gaseoso en un tubo de neón deben sustituirse en forma periódica con átomos frescos, porque la energía de los átomos tiende a agotarse con la excitación continua, lo que produce luz cada vez más tenue. ¿Qué dices de esto?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Los átomos de neón no liberan energía alguna que no les sea cedida por la corriente eléctrica en el tubo y, por tanto, no se "agotan". Cualquier átomo puede excitarse y desexcitarse sin límite. Si la luz, de hecho, se vuelve cada vez más tenue, es probable que se deba a una fuga. Por lo demás, no hay ventaja alguna en cambiar el gas en el tubo, porque un átomo "fresco" es indistinguible del "agotado". Ambos son atem-porales y más viejos que el sistema solar.

30.3 Espectros de emisión

Cada elemento tiene su propio patrón característico de niveles de energía electrónica y, por tanto, emite luz con su propio patrón característico de frecuencias, es decir, su espectro de emisión, cuando se excita. Este patrón puede observarse cuando la luz pasa a través de un prisma o, mejor aún, cuando pasa por primera vez por una rendija delgada SCREENCAST: Espectros atómicos

y luego se enfoca a través de un prisma sobre una pantalla de visualización. Al arreglo de una rendija, una lente de enfoque y un prisma (o rejilla de difracción) se le llama espectroscopio, uno de los instrumentos más útiles de la ciencia moderna (Figura 30.4).

F I G U R A 3 0 . 4

Un espectroscopio simple. Las imágenes

de la rendija iluminada se proyectan

sobre una pantalla y conforman un

patrón de líneas. El patrón espectral es

característico de la luz utilizada para

Fuente

iluminar la rendija.

Rendija

Prisma

Rojo

Amarillo

Violeta

Cada color componente se enfoca en una posición determinada, de acuerdo con su frecuencia, y forma una imagen de la rendija sobre la pantalla, película fotográfica o detector adecuado. Las imágenes de la rendija con diferentes colores se llaman líneas espectrales. En la Figura 30.5 se muestran algunos patrones espectrales típicos. Es habitual referirse a los colores en términos de sus longitudes de onda y no de sus frecuencias. Una frecuencia determinada corresponde a una longitud de onda determinada.1

Si la luz cedida por una lámpara de vapor de sodio se analiza en un espectroscopio, predomina una sola línea amarilla: una sola imagen de la rendija. Si se reduce el ancho de la rendija, se descubre que esta línea en realidad está compuesta de dos líneas muy cercanas. Estas líneas corresponden a las dos frecuencias de luz predominantes emitidas por átomos de sodio excitados. El resto del espectro parece negro. (En realidad, hay muchas otras líneas, con frecuencia demasiado tenues como para verse a simple vista.) Lo mismo ocurre con todos los vapores que brillan. La luz de una lámpara de vapor de mercurio muestra un par de líneas amarillas brillantes juntas (pero en diferentes 1Recuerda del Capítulo 19 que v 5 f donde v es la rapidez de onda, f es la frecuencia de la onda y (lambda) es la longitud de onda. Para la luz, v es la constante c, por lo que, a partir de c 5 f se ve la relación entre frec

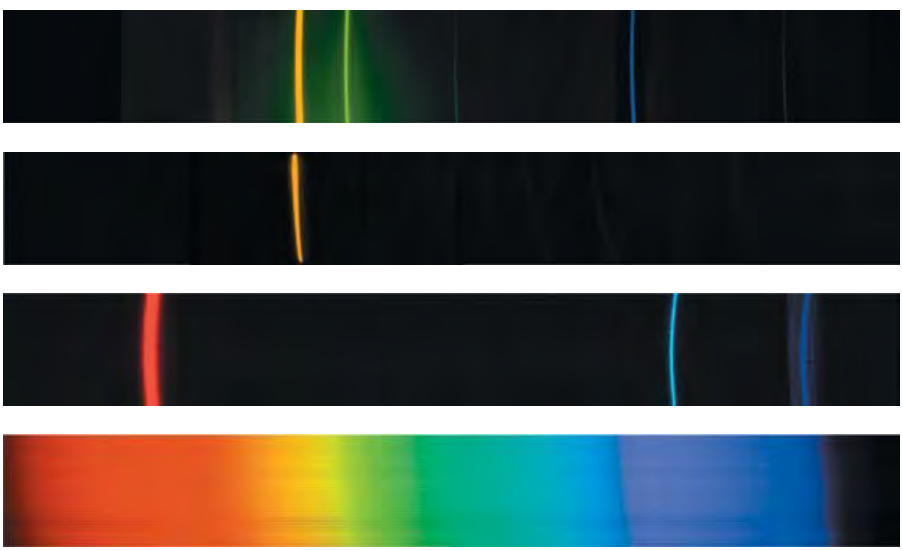
c

cuencia y longitud de onda, a saber, f =

y λ = .

λ

f



C A PÍ T U LO 3 0 EM ISI Ó N DE LU Z

F I G U R E 3 0 . 5

(a) Una bombilla incandescente tiene un

espectro continuo. Cada uno de los tres

elementos (b) hidrógeno, (c) sodio y

(a) bombilla incandescente

(d) mercurio tienen un espectro de

líneas diferente.

(b) hidrógeno

(c) sodio

(d) mercurio

posiciones a las del sodio), una línea verde muy intensa y varias líneas azul y violeta.

Un tubo de neón produce un patrón de líneas más complicado. Se observa que la luz emitida por cada elemento en la fase de vapor produce su propio patrón de líneas ca-Debido a que cada elemento

racterístico. Estas líneas corresponden a las transiciones electrónicas entre niveles de químico tiene su propio conjunto

energía atómicos y son tan características de cada elemento como las huellas digitales único de niveles de energía, cada

de una persona. Por tanto, el espectroscopio se usa de manera generalizada en análisis elemento también tiene su propio

químicos.

patrón distintivo de líneas espec-

La próxima vez que veas evidencia de excitación atómica, acaso la flama verde pro-trales de absorción (y emisión): la

"huella digital" espectral que los

ducida cuando un trozo de cobre se coloca en el fuego, haz bizco y

ve si puedes imagi-astrónomos usan para identificar

nar a los electrones saltando de un nivel de energía a otro en un patrón característico varios elementos químicos en los

del átomo que se esté excitando, un patrón que muestra un color único para dicho objetos astronómicos.

átomo. ¡Eso es lo que ocurre!

P U N T O D E C O N T R O L

Los patrones espectrales no son manchas deformes de luz sino que, más bien, consisten en líneas rectas finas y distintivas. ¿Por qué esto es así?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Las líneas espectrales son tan solo imágenes de la rendija, que en sí misma es una delgada abertura recta por la cual se admite luz antes de dispersarse por el prisma (o la rejilla de difracción). Cuando la rendija se ajusta para hacer más estrecha su abertura, pueden descomponerse líneas menos espaciadas (distinguibles entre sí). Una rendija más ancha admite más luz, lo que permite la detección más sencilla de una energía radiante más tenue. Pero el ancho es a costa de la resolución cuando las líneas con espacios más angostos se confunden entre sí.

30.4 Incandescencia

La luz que se produce como resultado de la alta temperatura tiene la propiedad de la incandescencia (de la palabra latina que significa "calentar"). Puede tener un tinte rojizo, como el del elemento calefactor de un tostador, o un tinte azulado, como el de una estrella particularmente caliente. O puede ser blanco, como el de una lámpara incandescente familiar. Lo que separa a la luz incandescente de la luz de un tubo de neón SCREENCAST: Emisión de luz

o una lámpara de vapor de mercurio es que contiene un infinito número de frecuencias, que se dispersan fácilmente a través del espectro. ¿Esto significa que un número infinito de niveles de energía caracteriza a los átomos de tungsteno que constituyen el filamento de la lámpara incandescente? La respuesta es no; si el filamento se vaporizara y luego excitara, el gas tungsteno emitiría luz con un número finito de frecuencias y produciría un color azulado global. La luz emitida por los átomos alejados entre sí en la fase gaseosa es muy diferente de la luz emitida por los mismos átomos empacados de manera compacta en la fase sólida. Esto es similar a las diferencias entre el sonido proveniente de una campana que tañe aislada y el de una caja atiborrada de campanas que tañen (Figura 30.6). En un gas, los átomos están separados. Los electrones experimentan transiciones entre los niveles de energía en el interior del átomo sin que los afecte la presencia de los átomos vecinos. Pero cuando los átomos están compactados, como en un sólido, los electrones de las órbitas exteriores realizan transiciones no sólo dentro de los niveles energéticos de sus átomos "padres", sino también entre los niveles de los átomos vecinos. Estos rebotan sobre dimensiones mayores a las de un solo átomo, lo que resulta en una variedad infinita de transiciones, de ahí el número infinito de frecuencias de energía radiante.

F I G U R A 3 0 . 6

Como podría esperarse, la luz incandescente depende de la temperatura porque es Una campana sola tañe con un sonido

una forma de radiación térmica. En la Figura 30.7. se muestra una gráfica de la ener-que tiene una frecuencia clara y nítida,

en tanto que el sonido que emana de

gía radiada sobre un amplio rango de frecuencias para dos temperaturas diferentes.

una caja de campanas apiñonadas es

(Recuerda que la curva de radiación para la luz solar se estudió en el Capítulo 27, y discordante. Lo mismo ocurre con la

la radiación de cuerpo negro se abordó en el Capítulo 16.) A medida que el sólido se diferencia entre la luz emitida por los

calienta más, ocurren más transiciones de energía alta y se emite radiación con una átomos en el estado gaseoso y la luz

frecuencia más alta. La curva abarca un espectro continuo. En la parte más brillante proveniente de los átomos en el estado

del espectro, la frecuencia predominante de la radiación emitida, la frecuencia pico, es sólido.

directamente proporcional a la temperatura absoluta del emisor:

f ~ T

Brillantez

de la luz

Se usa la barra sobre la f para indicar la frecuencia pico, porque desde la fuente incandescente se emiten radiaciones de muchas frecuencias. Si la temperatura de un Frecuencia pico

objeto (en kelvins) se duplica, la frecuencia pico de la radiación emitida se duplica. Las 1500°C

ondas electromagnéticas de luz violeta tienen casi el doble de frecuencia que las ondas de luz roja. Por tanto, una estrella caliente violeta tiene casi el doble de temperatura su-1000°C

perficial que una estrella caliente roja.2 La temperatura de los cuerpos incandescentes, sean estrellas o los interiores de altos hornos, puede determinarse al medir la frecuencia Frecuencia

pico (o color) de la energía radiante que emiten.

F I G U R A 3 0 . 7

Curvas de radiación para un sólido

incandescente.

P U N T O D E C O N T R O L

De acuerdo con las curvas de radiación que se muestran en la Figura 30.7,

¿cuál emite la mayor frecuencia promedio de energía radiante: la fuente de 1,000°C o la fuente de 1,500°C? ¿Cuál emite más energía radiante?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

La fuente radiante de 1,500°C emite la mayor frecuencia promedio, como se aprecia por la extensión de la curva hacia la derecha. La fuente de 1,500°C es más brillante y también emite más energía radiante, como se aprecia por su mayor desplazamiento vertical.

2Si estudias este tema más a fondo, entonces, como se mencionó en la nota al pie de página 3 del Capítulo 16, descubrirás que la tasa de tiempo a la que un objeto irradia energía (la potencia radiada) es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura Kelvin. De modo que una duplicación de temperatura corresponde a una duplicación de la frecuencia de energía radiante, pero a un aumento de 16 veces de la tasa de emisión de energía radiante.

30.5 Espectros de absorción

Cuando se ve luz blanca de una fuente incandescente con un espectroscopio, se observa un espectro continuo sobre todos los colores del arcoíris. Sin embargo, si un gas se coloca entre la fuente y el espectroscopio, una inspección cuidadosa mostrará que el espectro no es muy continuo. Este es un espectro de absorción, y hay líneas oscuras distribuidas por todo el espectro; estas líneas oscuras contra un fondo de muchos colores son como las líneas de emisión invertidas. Son líneas de absorción.

Arco

Vapor de sodio

Rendija

de carbono

Rojo

F I G U R A 3 0 . 8

Metal sodio

Calor

Arreglo experimental que muestra el

Violeta

espectro de absorción de un gas.

Los átomos absorben luz y emiten luz. Un átomo absorberá con más intensidad la luz que tenga las frecuencias para las cuales está sintonizado -algunas de las mismas frecuencias que emite. Cuando un haz de luz blanca pasa a través de un gas, los átomos del gas absorben luz con frecuencias seleccionadas de dicho haz. Esta luz absorbida vuelve a radiarse, pero en todas direcciones y no sólo en la dirección del haz incidente. Cuando la luz restante del haz se dispersa en un espectro, las frecuencias que fueron absorbidas aparecen como

líneas oscuras en el espectro continuo. Las posiciones de estas líneas oscuras corresponden exactamente a las posiciones de las líneas en un espectro de emisión del mismo gas (Figura 30.9).

Si bien el Sol es una fuente de luz incandescente, el espectro que

F I G U R A 3 0 . 9

produce, cuando se examina de cerca, no es continuo. Hay muchas líneas de absorción, Espectros de emisión y de absorción.

llamadas líneas de Fraunhofer, en honor del óptico y físico bávaro Joseph von Fraunhofer, quien las observó primero y las mapeó con exactitud. Hay líneas similares en los espectros producidos por las estrellas. Estas líneas indican que el Sol y las estrellas están cada

una rodeadas por una atmósfera de gases más fríos que absorben parte de la luz proveniente del cuerpo principal. El análisis de estas líneas revela la composición química de las atmósferas de dichas fuentes. Con base en estos análisis se descubre que los elementos estelares son los mismos elementos que existen sobre la Tierra. Un dato interesante extra es que, en 1868, un análisis espectroscópico de la luz solar mostró unas líneas espectrales diferentes de cualquiera conocida sobre la Tierra. Estas líneas identificaron un nuevo elemento, que se denominó helio, en honor de Helios, el dios griego del Sol. El helio se descubrió en el Sol antes de descubrirse en la Tierra. ¡Qué tal!

Es posible determinar la rapidez de las estrellas si se estudian los espectros que emiten. Así como una fuente sonora en movimiento produce un corrimiento Doppler en su tono (consulta el Capítulo 19), una fuente luminosa en movimiento produce un corrimiento Doppler en su frecuencia luminosa. La frecuencia (¡no la rapidez!) de la luz emitida por una fuente que se aproxima es más alta, en tanto que la frecuencia de la luz proveniente de una fuente que se aleja es menor, que la frecuencia de la luz proveniente de una fuente estacionaria. Las correspondientes líneas espectrales se desplazan hacia el extremo rojo del espectro en el caso de las fuentes que retroceden. Casi todas las galaxias muestran un corrimiento al rojo en sus espectros, evidencia de que el universo La galaxia Andrómeda se aproxima

se expande.

al sistema solar, y emite luz hacia la

En el Capítulo 31, verás cómo los espectros de los elementos permiten determinar Tierra que se corre al azul.

la estructura atómica.

P U N T O D E C O N T R O L

Distingue entre espectros de emisión, espectros continuos y espectros de absorción.

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Los espectros de emisión los producen gases delgados en los que los átomos no experimentan muchas colisiones. Los espectros continuos resultan cuando los átomos chocan en forma continua, razón por la cual sólidos, líquidos y gases densos emiten luz en todas las frecuencias visibles cuando se calientan. Los espectros de absorción ocurren cuando la luz pasa a través de un gas diluido y los átomos del gas absorben en frecuencias características. Puesto que es poco probable que la luz reemitida se emita en la misma dirección que los fotones absorbidos, en el espectro aparecen líneas oscuras (ausencia de luz).

30.6 Fluorescencia

La agitación térmica y el bombardeo con partículas, como los electrones de alta rapidez, no son los únicos medios para impartir energía de excitación a un átomo. Un átomo puede excitarse cuando absorbe un fotón de luz. A partir de la relación E 5 hf, se observa que la luz de alta frecuencia, como la ultravioleta, que se encuentra más allá del espectro visible, suministra más energía por fotón que la

luz de frecuencia más baja.

Muchas sustancias experimentan excitación cuando se iluminan con luz ultravioleta.

Muchos materiales que se excitan con luz ultravioleta emiten luz visible en la desexcitación. La acción de estos materiales se denomina fluorescencia. En estos materiales, un fotón de luz ultravioleta excita al átomo y eleva un electrón a un estado de energía más alto. En este salto cuántico hacia arriba, es probable que el átomo realice un salto sobre varios estados energéticos intermedios. De modo que, cuando el átomo se desexcita, puede dar saltos más pequeños y emitir fotones con menos energía.

F I G U R A 3 0 . 1 0

En la fluorescencia, la energía del fotón

ultravioleta absorbido eleva al electrón

de un átomo a un estado de energía más

alto. Cuando después el electrón regresa

a un estado intermedio, el fotón emitido

es menos energético y, por tanto,

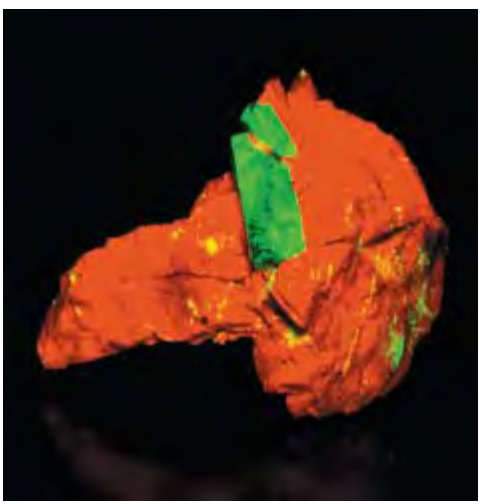
tiene menor frecuencia que el fotón

ultravioleta.

Este proceso de excitación y desexcitación es como subir un tramo de escaleras de un solo salto y luego descender uno o dos peldaños a la vez en lugar de bajarlos todos de un solo salto. Se emiten fotones con frecuencias más bajas. Por tanto, la luz ultravioleta que alumbra sobre el material hace que brille todo rojo, amarillo o de cualquier color que sea característico del material. Se utilizan colorantes fluorescentes en pinturas ***F I G U R A 3 0 . 1 1***

Un átomo excitado puede desexcitarse

en varias combinaciones de saltos.



y telas para hacerlos brillar cuando son bombardeados con fotones ultravioleta de la luz solar. Pueden ser espectaculares cuando se iluminan con una lámpara ultravioleta.

En los detergentes de los que se afirma que limpian tu ropa y la

dejan "más blanca que el blanco" se aplica el principio de la fluorescencia. Dichos detergentes contienen un tinte fluorescente que convierte la luz ultravioleta de la luz solar en luz visible azul, de modo que la ropa lavada de esta forma parece reflejar más luz azul de la que refle-jaría de otro modo. Esto hace que la ropa parezca más blanca.3

La próxima vez que visites un museo de ciencias naturales, dirígete a la sección de geología y echa un vistazo a los minerales iluminados con luz ultravioleta (Fi- F I G U R A 3 0 .12

gura 30.13). Observarás que diferentes minerales irradian varios colores. Esto es de Crayones fluorescentes de varios colores esperarse porque los diferentes minerales están compuestos de elementos diversos, los bajo luz ultravioleta.

cuales, a su vez, tienen varios conjuntos de niveles electrónicos de energía. Observar los minerales radiantes es una hermosa experiencia visual, que es todavía más fascinante si se integra con tu conocimiento de los aconteceres submicroscópicos de la naturaleza. Fotones ultravioleta de alta energía golpean los minerales, lo que produce la excitación de los átomos en la estructura mineral. Las frecuencias de la luz que ves corresponden a los pequeños espaciamientos de los niveles de energía conforme la energía baja en cascada. Todo átomo excitado emite sus frecuencias características, y no hay dos minerales diferentes que emitan luz de exactamente el mismo color. La belleza está tanto en el ojo como en la mente del observador.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Por qué sería imposible que un material fluorescente emita luz ultravioleta cuando se ilumina con luz infrarroja?

F I G U R A 3 0 . 1 3

La roca contiene los minerales fluores-

centes calcita y willemita, los cuales,

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

bajo luz ultravioleta, se ven claramente

La salida de energía del fotón sería mayor que la energía de entrada del fotón, lo como rojo y verde, de manera respectiva.

que violaría la ley de conservación de la energía.

30.7 Fosforescencia

Cuando se excitan, ciertos cristales y algunas moléculas orgánicas grandes, permanecen en un estado de excitación durante un periodo prolongado de tiempo. A diferencia de lo que ocurre en los materiales fluorescentes, sus electrones se elevan a niveles de energía más altos y quedan "atorados". En consecuencia, hay un retraso temporal entre los procesos de excitación y desexcitación. Los materiales que presentan esta propiedad particular se dice que tienen fosforescencia.

El elemento fósforo se utiliza en varios materiales luminosos, incluso en los cepillos de dientes, que se hacen para brillar en la oscuridad. Los átomos o moléculas de estos materiales se excitan con luz visible incidente. En lugar de desexcitarse de inmediato, como lo hacen los materiales fluorescentes, muchos de los átomos permanecen en un estado metaestable, un estado prolongado de excitación, en ocasiones Para hacer más difícil la falsifica-hasta durante horas, aunque casi todos se desexcitan en forma rápida. Si la fuente de ción, muchos gobiernos, incluido

excitación se retira (por ejemplo, si las luces se apagan), permanece una postlumi-el gobierno estadounidense,

niscencia al tiempo que millones de átomos experimentan una desexcitación gradual utilizan la fluorescencia. Para ob-espontánea. La postluminiscencia de algunos interruptores de luz fosforescentes en servarlo por ti mismo, expón a luz

la casa puede durar más de una hora. Lo mismo sucede con los diales de los relojes UV un billete estadounidense del

luminosos, que se excitan con luz visible. Algunos diales de relojes antiguos brillan nuevo diseño. Cerca del extremo,

aparecerá una línea que no puede

indefinidamente en la oscuridad, no debido a una gran demora temporal entre exci-verse con luz visible. Este hilo fluo-

tación y desexcitación, sino porque contienen radio u algún otro material radiactivo rescente puede verse en el anverso

que de manera continua suministra energía para mantener en

marcha el proceso de y el reverso del billete.

3Es muy interesante que los mismos detergentes comercializados en México y algunos otros países se adapten para ofrecer un efecto más rosa y cálido.

excitación. Tales diales ya no son comunes debido al daño potencial del material radiactivo para el usuario, en especial si está en un reloj de pulsera o de bolsillo.4

Muchos seres vivos (desde bacterias hasta luciérnagas y animales más grandes, como las medusas) excitan químicamente las moléculas de sus cuerpos que emiten luz. Se dice que tales criaturas vivas son bioluminiscentes. Bajo ciertas condiciones, algunos peces se vuelven luminiscentes cuando nadan, pero permanecen oscuros cuando están estacionarios. Bancos de estos peces quedan inmóviles y no se ven, pero cuando se les perturba, salen disparados hacia las profundidades con luz súbita, lo que crea una especie de fuegos artificiales en lo profundo del mar. El mecanismo de bioluminiscencia no se comprende bien y se investiga en la actualidad.

C H E C K P O I N T

Distingue entre fluorescencia y fosforescencia en términos de tiempo.

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Los materiales fluorescentes emiten luz en forma inmediata después de ser excitados. En el caso de los materiales fosforescentes hay un retraso en el tiempo entre excitación y desexcitación.

Filamento

30.8 Lámparas

Lámpara incandescente

La lámpara incandescente común consiste en una envoltura de vidrio con un filamento de alambre de tungsteno en su interior, a través del cual pasa una corriente eléctrica (FigurA 30.14). La corriente suele calentar el filamento a 2,000 K o 3,000 K, Aislante

muy por debajo del punto de fusión del tungsteno, que es de 3,695 K. El filamento caliente emite un espectro continuo, principalmente en el infrarrojo, y la luz visible es F I G U R A 3 0 . 1 4

Versión simplificada de una bombilla

la parte más pequeña y útil. La envoltura de vidrio evita que el oxígeno del aire llegue incandescente. Una fuente de voltaje

al filamento caliente, que de otro modo se destruiría por una rápida oxidación. Con el proporciona aumentos de energía a los

tiempo, el filamento falla de cualquier forma debido a su gradual evaporación, lo que a electrones del filamento de alta resisten-la larga conduce a que se rompa el filamento y a que la bombilla "se queme."

cia. Una porción relativamente pequeña

Por lo general, el argón es el gas que está en el interior de la envoltura. Si una pe-de esta energía se convierte en luz.

queña cantidad de un elemento halógeno, como el yodo, se agrega al interior, la evaporación del tungsteno se frena y la bombilla dura más tiempo. Para que el halógeno actúe es indispensable que toda la bombilla esté muy caliente (¡no toques una lámpara de halógeno que brilla!), por lo que la bombilla se hace más pequeña y generalmente se encierra en cuarzo resistente al calor. La lámpara de halógeno también puede ser un Aunque la bombilla incandescente

no la inventó Thomas Edison, él

poco más eficiente que la lámpara incandescente convencional.

fue el primero en fabricar una que

La eficiencia de las bombillas incandescentes como emisoras de luz visible suele ser superaba a otras versiones de la

menor al 10%. En consecuencia, se están sustituyendo de manera gradual con lámpa-época e inventó todo un sistema

ras que convierten un mayor porcentaje de la energía eléctrica en luz visible.

integrado de iluminación eléctrica.

Lámpara fluorescente

La lámpara fluorescente común consiste en un tubo de vidrio cilíndrico con electrodos en cada extremo (Figura 30.15). En la lámpara, como en el tubo de un letrero de neón, F I G U R A 3 0 . 1 5

Fotón ultravioleta

Un tubo fluorescente. Un gas en el tubo,

excitado por una corriente eléctrica

Fósforo

alterna, emite luz ultravioleta (UV). La

Mercurio

luz UV, a su vez, excita los fósforos en

la superficie interior del tubo de vidrio,

que emite luz blanca.

Electrones emitidos del filamento

4Sin embargo, una forma radiactiva de hidrógeno llamada tritio puede servir para que los diales de los relojes se iluminen de un modo inofensivo. Esto se debe a que su radiación no tiene suficiente energía como para penetrar el metal o el plástico de la caja del reloj.

los electrones se desprenden de los electrodos y se fuerzan a vibrar a grandes rapideces dentro del tubo mediante el voltaje CA. El tubo está lleno con vapor de mercurio a muy baja presión, que se agrega al argón. Los átomos de mercurio se excitan por el impacto de los electrones de gran rapidez. Mucha de la luz emitida está en la región ultravioleta. Este es el proceso de excitación primario. El proceso

secundario ocurre cuando la luz ultravioleta golpea los fósforos, materiales en polvo que se encuentran sobre la superficie interior del tubo. Los fósforos se excitan por la absorción de los fotones ultravioleta y presentan fluorescencia, emitiendo una multitud de fotones de frecuencia más baja que se combinan para producir luz visible. Pueden usarse diferentes fósforos para producir diferentes colores o "texturas" de luz.

Lámpara fluorescente compacta

Miniaturiza un tubo fluorescente, enróllalo en una bobina y equípalo con el mismo tipo de conector que tiene una lámpara incandescente común, y tendrás una lámpara fluorescente compacta (CFL, por sus siglas en inglés). Al igual que las lámparas fluorescentes tipo tubo tradicionales, las CFL son más eficientes que las lámparas incan- F I G U R A 3 0 .1 6

descentes y producen alrededor de 4 veces más luz por la misma entrada de potencia. Este par de CFL de 23 W emite tanta Se colocan en los portalámparas convencionales y tienen duraciones 10 mayores que luz como un par de bombillas incan-las bombillas incandescentes. Como se mencionó aquí y en el Capítulo 23, las lámpa- descentes de 100 W que funcionan al ras incandescentes se están sustituyendo con iluminación más eficiente.

mismo voltaje.

Al igual que la lámpara tubular, una CFL tiene dos partes principales: el tubo lleno de gas (vapor de mercurio mezclado con argón) y el balastro magnético o electrónico. Mientras que el balastro utilizado en los primeros tubos fluorescentes era magnético, ahora son mucho más frecuentes los balastros electrónicos y no parpadean como los anteriores. El balastro proporciona la potencia inicial para activar una descarga de arco, incrementa la frecuencia operativa mediante sus transistores y estabiliza la corriente. Los fósforos del SCREENCAST: Lámparas

interior de la lámpara pueden elegirse para producir no sólo diferentes tonos de luz blanca, sino también luz de color: amaril o para una iluminación exterior que no atrae insectos, o ultravioleta de onda larga para efectos especiales.

Un inconveniente de las lámparas fluorescentes, ya sean compactas o no, es su contenido de mercurio, que plantea problemas ambientales con su desecho. Una alternativa más atractiva para la

iluminación son las bombil as LED con portalámparas del tipo rosca.

Diodo emisor de luz

Un diodo es un dispositivo electrónico con dos terminales que permite un flujo de carga en una sola dirección. Recuerda del Capítulo 23 la breve exposición del uso de un diodo para convertir CA en CD en circuitos eléctricos. Los diodos cumplen varias funciones, como la regulación de voltaje en circuitos, la amplificación de señales, la medición de la iluminación y la conversión de luz en electricidad como fotoceldas. Un tipo de diseño de diodo es el inverso de una fotocelda, ¡en el que un voltaje estimula la emisión de luz!

Este es un diodo emisor de luz (LED, por sus siglas

en inglés). Los primeros LED creados en la década

de 1960 producían la luz roja común en los paneles

de instrumentos de la época. Te hacían saber si tu

sistema de música estaba encendido o apagado. Los

LED que emiten un rango completo de colores se

desarrol aron en la década de 1990. En la actualidad,

los LED no sólo se utilizan en los indicadores de las

pantal as de los aparatos electrónicos, sino que son

comunes en los semáforos, las luces de frenado de los

F I G U R E 3 0 . 1 7

automóviles, la iluminación de las pistas de aterriza-

Evan sostiene dos LED. El más grande,

je de los aeropuertos, las luces de advertencia en las

un GeoBulb (www.ccrane.com), utiliza

torres de transmisión de televisión e incluso en los

menos de 8 W y es el primer reemplazo

anuncios espectaculares. Los LED son compactos y

directo de una bombilla incandescente

eficientes, no necesitan filamentos, son de larga du-

de 60 W del mismo tamaño. El LED

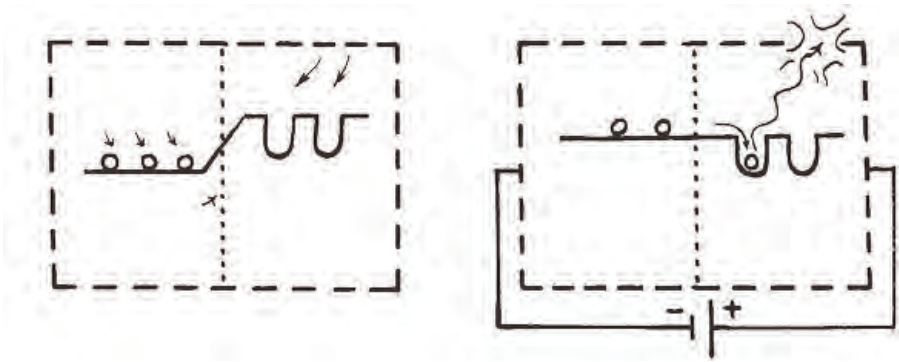
más pequeño, común en las linternas,

ración (unas 100 veces más duraderos que las bombi-

emite 15 veces más luz por watt que una

l as incandescentes) y no contienen mercurio dañino.

bombilla incandescente.



574

PA R T E SEI S

LU Z

En el diseño común de un LED, una capa de un semiconductor que contiene electrones libres se deposita sobre la superficie de otro semiconductor que contiene “agujeros” de energía que pueden aceptar los electrones libres. Una barrera eléctrica en la Cuando un diodo acumula luz

frontera de estos dos materiales bloquea el flujo de electrones (Figura 30.18a). Pero y produce electricidad, es una

cuando se aplica una voltaje externo, la barrera es superada y los electrones energéticos celda solar. Cuando la entrada es

electricidad y la salida es luz, es un

cruzan sobre ella y “caen” en los “agujeros” de energía. En una forma similar a la desLED. ¡Otra agradable simetría en

excitación, los electrones caídos pierden energía potencial que se convierte en cuantos la física!

de luz: fotones (Figura 30.18b). Al igual que una bola de boliche que rueda sobre una mesa produce un fuerte “tronido” cuando golpea el piso, el “tronido” análogo de los electrones en un LED es la emisión de luz. La energía de los electrones que disminuye se convierte en luz.

F I G U R E 3 0 . 1 8

“Agujeros” de energía

Fotón

(a) Un chip LED consiste en dos semi-

conductores, uno con electrones flojos y

el otro con “agujeros”.

Electrones

(b) Cuando un voltaje se aplica, los

electrones cruzan la barrera, ocupan

los “agujeros” y emiten luz. El chip de

Barrera

0.25 mm cuadrados está rodeado con

eléctrica

un domo epóxico transparente (no se

muestra) de aproximadamente 2-10 mm

(a)

LED

(b)

de diámetro.

Los elementos utilizados en la fabricación de un LED determinan la profundidad de los “agujeros” de energía y, por tanto, el color de los fotones emitidos. Un mayor Un tipo de diodo, el diodo emisor

descenso de energía libera luz más cerca del azul; un menor descenso de energía libera de luz orgánico (OLED, por sus

luz hacia el rojo. La enorme pantalla LED comercial del tablero que se muestra en las siglas en inglés), es delgado,

fotografías al inicio del capítulo está compuesta de conjuntos de LED en series de tres.

ligero, brillante y fácil de fabricar.

Cada LED de una serie puede producir un solo color: rojo, verde o azul. Como con Tal vez los OLED lleguen a ser

las pantallas de televisión, cada LED se activa para producir la mezcla deseada de rojo, importantes en la producción

verde y azul. Todo el rango de colores sigue las reglas de mezcla de colores del Capítu-de grandes pantallas flexibles,

decoraciones para muros, ¡e

lo 27. Entonces, hay bombillas LED de luz blanca que emplean fósforos.

incluso ropa iluminada! ¡Esta

posibilidad le confiere un nuevo

significado a la frase "blue jeans"!

30.9 Láseres

Los fenómenos de excitación, fluorescencia y fosforescencia sirven de base para el funcionamiento de un instrumento fascinante, el láser (acrónimo en inglés de amplificación de luz por emisión estimulada de radiación).5 Si bien el primer láser se concibió en 1958 y en realidad se fabricó en 1960, el concepto de emisión estimulada SCREENCAST: Luz láser

lo predijo Albert Einstein en 1917. Para entender cómo opera un láser, primero debes estudiar la luz coherente.

La luz emitida por una lámpara común es incoherente; esto es: se emiten fotones de muchas frecuencias y en muchas fases de vibración. La luz es tan incoherente como las huellas sobre el piso de un auditorio cuando una multitud de personas caminan en desorden por el lugar. La luz incoherente es caótica. Un haz de luz incoherente se dispersa desde una corta distancia, y se vuelve cada vez más ancho y menos intenso a mayor distancia.

F I G U R A 3 0 . 1 9

La luz blanca incoherente contiene

ondas de muchas frecuencias (y de

muchas longitudes de onda) que están

fuera de fase entre sí.

5Una palabra que se construye con las iniciales de una frase se llama acrónimo.

C A PÍ T U LO 3 0 EM ISI Ó N DE LU Z

575

Incluso si el haz se filtra de modo que consista en ondas de una sola frecuencia (luz monocromática), todavía es incoherente porque las ondas están fuera de fase entre sí.

F I G U R A 3 0 . 2 0

La luz de una sola frecuencia y longitud

de onda todavía contiene una mezcla de

fases.

Un haz de fotones que tenga la misma frecuencia, fase y dirección (esto es, un haz de fotones que sean copias idénticas unos de otros) se dice que es coherente. Un láser emite un haz de luz coherente que se dispersa y se debilita muy poco.6

F I G U R A 3 0 . 2 1

Luz coherente. Todas las ondas son

idénticas, están en fase y en la misma

dirección.

Todo láser tiene una fuente de átomos llamada medio activo, que puede ser un gas, un líquido o un sólido (el primer láser fue un cristal rubí). Los átomos en el medio se excitan a estados metaestables mediante una fuente de energía externa. Cuando la mayoría de los átomos en el medio se excita, un solo fotón de un átomo que experimenta desexcitación puede comenzar una reacción en cadena. Este fotón golpea otro átomo y lo estimula a emitir, y así

sucesivamente, lo que produce luz coherente. La mayor parte de esta luz inicialmente se mueve en direcciones aleatorias. Sin embargo, la luz que viaja a lo largo del eje del láser se refleja en espejos recubiertos para reflejar la luz con la longitud de onda deseada en forma selectiva. Un espejo es totalmente reflector, mientras que el otro refleja de manera parcial. Las ondas reflejadas se refuerzan entre sí después de dar un viaje completo y reflejarse en los dos espejos; esto establece una condición de resonancia de ida y vuelta en la que la luz se acumula hasta una intensidad considerable. La luz que escapa por el extremo con el espejo más transparente constituye el haz del láser. Además de los láseres de gas y cristal, hay otros tipos se han incorporado a la familia láser: láseres de vidrio, químicos, líquidos y semiconductores.

Los modelos actuales producen haces que varían del infrarrojo al ultravioleta. Algunos modelos pueden ajustarse a varios rangos de frecuencia.

Un láser no es una fuente de energía. Es simplemente un convertidor de energía que aprovecha el proceso de emisión estimulada para concentrar cierta fracción de su energía (en general, 1%) en energía radiante de una sola frecuencia que se mueve en una sola dirección. Al igual que todos los dispositivos, un láser no puede sacar más energía de la que se pone en él.

Un haz láser no se ve a menos que

se disperse gracias a algo que esté

Los láseres tienen un amplio uso en cirugía. Los láseres también se utilizan en pro-en el aire. Al igual que los rayos

cedimientos de corte y soldadura, principalmente cuando hay partes pequeñas. Cortan solares o los rayos lunares, lo que

con precisión. Los haces láser sueldan alambres en microcircuitos y reparan alambres ves son las partículas en el medio

dañados dentro de tubos de vidrio. Se usan para leer CD y DVD, y crean hologramas.

de dispersión, no el haz en sí.

Un día, podrán desencadenar energía de fusión controlada. En las comunicaciones Cuando el haz golpea una superficie difusa, parte de él se dispersa

tienen un enorme uso. Mientras que las longitudes de onda de radio abarcan cien-hacia tus ojos como un punto.

tos de metros y las longitudes de onda de televisión abarcan muchos centímetros, las 6Lo angosto de un haz láser es evidente cuando ves que un conferencista produce una diminuta mancha roja sobre una pantalla con su "apuntador" láser. La luz de un láser intenso apuntado a la Luna se ha reflejado y detectado de vuelta sobre la Tierra; con ello se ha revelado la distancia entre la Tierra y la Luna con un margen de una pulgada.

576

PA R T E SEI S

LU Z

(a)

(d)

(b)

(e)

(c)

(f)

(g)

F I G U R A 3 0 . 2 2

Acción láser en un láser helio-neón.

(a) El láser consiste en un estrecho tubo Pyrex que contiene una mezcla de gases a baja presión que consta de 85% de helio (pequeños puntos negros) y 15% de neón (grandes puntos de color).

(b) Cuando una corriente de alto voltaje pasa por el tubo, excita a los átomos de helio y de neón hasta sus estados más altos habituales y de inmediato experimentan desexcitación, excepto por un estado en el helio que se caracteriza por una demora prolongada antes de su desexcitación: un estado metaestable. Dado que este estado es relativamente estable, se acumula una población importante de átomos de helio excitados (círculos abiertos negros). Estos átomos vagan en el tubo y actúan como una fuente de energía para el neón,

que de otro modo tiene un estado metastable difícil de alcanzar muy cercano a la energía del helio excitado.

(c) WCuando los átomos de helio excitados chocan con átomos de neón en sus estados de energía más bajos (estado base), el helio cede su energía al neón, que es elevado a su estado metastable (círculos abiertos rojos). El proceso continúa y la población de átomos de neón excitados pronto supera a los átomos de neón en un estado excitado de menor energía. Esta población invertida, en efecto, espera irradiar su energía.

(d) Algunos átomos de neón a la larga se desexcitan e irradian fotones rojos en el tubo. Cuando esta energía radiante pasa a otros átomos de neón excitados, los primeros se estimulan para emitir fotones exactamente en fase con la energía radiante que estimuló la emisión. Los fotones salen del tubo en direcciones irregulares, lo que produce un brillo rojo.

(e) Los fotones que se mueven paralelos al eje del tubo se reflejan en espejos paralelos con un recubrimiento especial en los extremos del tubo. Los fotones reflejados estimulan la emisión de fotones desde otros átomos de neón, lo que en consecuencia produce una avalancha de fotones que tienen la misma frecuencia, fase y dirección.

(f) Los fotones destellan de ida y vuelta entre los espejos, y se amplifican con cada paso.

(g) Algunos fotones se "fugan" de uno de los espejos, que sólo es parcialmente reflector. Esto constituye el rayo láser.

longitudes de onda de la luz láser se miden en millonésimas de centímetro. En correspondencia, las frecuencias de la luz láser son mucho mayores que las frecuencias de radio y televisión. Como resultado, la luz láser puede transmitir un enorme número de mensajes apiñados en una banda de frecuencias muy estrecha. Las comunicaciones pueden transmitirse en un haz láser dirigido a través del espacio, a través de la atmósfera o a través de fibras ópticas (tuberías de luz) que pueden doblarse como cables.

El láser actúa en las cajas registradoras de los supermercados, donde máquinas lectoras de códigos escanean el símbolo de Código de Producto Universal (UPC) impreso en los paquetes y en la cubierta posterior de este libro. La luz láser se refleja de las barras y los espacios y se convierte en una señal eléctrica cuando se escanea el símbolo.

La señal sube a un valor alto cuando se refleja desde un espacio claro y cae hasta un valor bajo cuando se refleja de una barra oscura. La información en el grosor y espaciamiento de las barras se "digitaliza" (convierte en 1 y 0 de código binario) y se procesa mediante una computadora.

Los científicos ambientales usan láseres para medir y detectar contaminantes en F I G U R A 3 0 . 2 3

Un láser de helio-neón.

los gases de los escapes de los vehículos. Diferentes gases absorben luz a longitudes de ondas características y dejan sus "huellas digitales" sobre un haz reflejado de luz láser.

La longitud de onda específica y la cantidad de luz absorbida se analizan en una computadora, que produce una tabulación inmediata de los contaminantes.

Los láseres vaticinan toda una nueva tecnología, cuya promesa se convierte en realidad continuamente. El futuro de las aplicaciones del láser parece ilimitado.

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)

Excitación. Proceso de elevar uno o más electrones de un

derivadas de la absorción de luz de ciertas frecuencias por

átomo o molécula de un nivel de energía más bajo a uno

una sustancia a través de la cual pasa la energía radiante.

más alto. Un átomo en un estado excitado por lo general

Fluorescencia. Propiedad de ciertas sustancias de absorber

decaerá (se desexcitará) con rapidez a un estado más bajo

radiación de una frecuencia y reemitir radiación de frecuen-

mediante la emisión de un fotón. La energía del fotón es

cia más baja. La fluorescencia ocurre cuando un átomo se

proporcional a su frecuencia: E 5 hf.

eleva a un estado excitado y pierde su energía en dos o más

Espectro de emisión. Distribución de las longitudes de onda

saltos descendentes hacia un estado de energía más bajo.

que están en la luz proveniente de una fuente luminosa.

Fosforescencia. Un tipo de emisión de luz que es igual a la fluorescencia, excepto por un retraso entre la excitación y la desexcitación, lo que proporciona postluminiscencia. El retraso es causado por átomos excitados a estados energéticos que no decaen en forma rápida. La postluminiscencia puede durar desde fracciones de segundo hasta horas o incluso días, de acuerdo con el tipo de material, la temperatura y otros factores.

Incandescencia Estado de brillo mientras la temperatura es alta, causado por los electrones que rebotan sobre dimensiones mayores que el tamaño de un átomo y emiten energía radiante en el proceso. La frecuencia pico de la energía radiante es proporcional a la temperatura absoluta de la sustancia calentada: f ~ T.

Láser. amplificación de luz por emisión estimulada de radiación (del inglés light amplification by stimulated emission of radiation) Instrumento óptico que produce un haz de luz monocromática coherente.

Espectroscopio. Instrumento óptico que separa la luz en sus longitudes de onda que la constituyen en la forma de líneas espectrales.

Espectro de absorción. Un espectro continuo, como el de la luz blanca, interrumpido por líneas o bandas oscuras

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N) 30.1 Emisión de luz

30.2 Excitación

1. Los electrones puestos a vibrar a algunos cientos de miles de

3. ¿Cuáles tienen más energía potencial en relación con el

hertz emiten ondas de radio. ¿Qué clase de ondas se emiten

núcleo: los electrones en las capas electrónicas interiores o

de las vibraciones electrónicas de algunos tril ones de hertz?

los electrones en las capas electrónicas exteriores?

2. ¿Qué se entiende cuando se dice que un estado de energía

4. En un tubo de neón, ¿qué ocurre inmediatamente des-

es discreto?

pués de que un átomo se excita?

5. ¿Cómo se relaciona la diferencia de energía entre los nive-16. ¿Cómo es que un astrofísico puede decirte si una estrella

les energéticos, con la energía del fotón que se emite por

se aleja o se aproxima a la Tierra?

una transición entre dichos niveles?

6. ¿Cómo se relaciona la energía de un fotón con su frecuen-

30.6 Fluorescencia

cia vibratoria?

17. ¿Por qué la luz ultravioleta, pero no la luz infrarroja, es

7. ¿Cuál tiene mayor frecuencia: la luz roja o la luz azul? ¿Cuál efectiva para hacer fluorescentes ciertos materiales?

tiene la mayor energía por fotón: la luz roja o la luz azul?

30.7 Fosforescencia

8. ¿Un átomo de neón en un tubo de vidrio puede excitarse

18. Distingue entre fluorescencia y fosforescencia.

más de una vez? Explica.

19. ¿Qué es un estado metaestable?

9. ¿Qué indican los colores variados mostrados en la flama

de un leño ardiendo?

30.8 Lámparas

10. ¿Cuál pone el mayor porcentaje de su energía como luz:

20. ¿Por qué se usa argón, en lugar de aire, dentro de una

una lámpara incandescente o una lámpara de vapor de

bombilla incandescente?

mercurio?

21. Distingue entre los procesos de excitación primaria y

secundaria que ocurren en una lámpara fluorescente.

30.3 Espectros de emisión

22. ¿Cómo se compara la duración de una CFL típica con la

11. ¿Qué es un espectroscopio y qué es lo que hace?

duración de una bombilla incandescente?

30.4 Incandescencia

23. ¿Cómo se compara la duración de un LED típico con la

12. Cuando un gas brilla, se emiten colores discretos. Cuan-

duración de una bombilla incandescente?

do un sólido brilla, los colores son borrosos. ¿Por qué?

30.9 Láseres

13. ¿Cómo se relaciona la frecuencia pico de la luz emitida,

24. Distingue entre la luz monocromática y la luz solar.

con la temperatura de su fuente incandescente?

25. Distingue entre la luz coherente y la luz solar.

30.5 Espectros de absorción

26. ¿Cómo difiere la avalancha de fotones en un haz láser,

14. ¿Cómo difiere la apariencia de un espectro de absorción

de las multitudes de fotones emitidos por una lámpara

de la de un espectro de emisión?

incandescente?

15. ¿Qué son las líneas de Fraunhofer?

P I E N S A Y R E A L I Z A (A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 27. *Chatea con o escribe una carta a la abuela para explicarle*

espaciadas). Si la farola es redonda, verás círculos en lugar

cómo las lámparas, flamas y láseres emiten luz. Cuén-

de líneas; si miras por una rendija cortada en cartón o

tale por qué los tintes y pinturas fluorescentes son tan

algún material similar, verás líneas. Lo que ocurre con

impresionantemente vívidos cuando se iluminan con una

las ahora comunes lámparas de sodio a alta presión es

lámpara ultravioleta. Háblale también de las mayores efi-

más interesante. Debido a las colisiones de los átomos

ciencias de las CFL y los LED.

excitados, verás un espectro borroso que es casi continuo,

28. Pide a tu instructor de física que te preste una rejilla de

casi como el de una lámpara incandescente. Justo en la

difracción. Su aspecto es el de una diapositiva fotográfi-

posición amarilla, donde esperarías ver la línea de sodio,

ca, y la luz que pasa o se refleja en ella se difracta en sus

hay un área oscura. Esta es la banda de absorción del

colores componentes mediante miles de líneas finas. Mira

sodio. Se debe al sodio más frío, que rodea la región de

a través de la rejilla la luz proveniente de una farola de

emisión de alta presión. Deberás ver esto más o menos a

vapor de sodio. Si se trata de una lámpara de presión baja,

una cuadra de distancia de modo que la línea, o círculo,

verás la agradable "línea" espectral amarilla que domina a

sea suficientemente pequeña como para permitir que se

la luz de sodio (en realidad, son dos líneas estrechamente

mantenga la resolución. Intenta esto. ¡Es muy fácil de ver!

C A PÍ T U LO 3 0 R E V ISI Ó N

579

P I E N S A Y R E S U E L V E (A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 29. En el diagrama, la diferencia de energía entre los estados

C

A y B es el doble que la diferencia de energía entre los

estados B y C. En una transición (salto cuántico) de C a

B

B, un electrón emite un fotón con una longitud de onda

de 600 nm.

(a) ¿Cuál es la longitud de onda emitida cuando el fotón

A

salta de B a A?

(b) ¿Cuando éste salta de C a A?

P I E N S A Y E X P L I C A (S Í N T E S I S)

30. ¿Por qué un fotón de rayos gamma es más energético que

43. Una estrella azul es aproximadamente el doble de caliente

un fotón de rayos X?

que una estrella roja. Pero las temperaturas de los gases

31. ¿Alguna vez viste un incendio y observaste que la quema

en los letreros publicitarios son aproximadamente iguales,

de varios materiales con frecuencia produce llamas de dife-

ya sea que emitan luz roja o azul. ¿Cuál es tu explicación?

rentes colores? ¿Por qué esto es así?

44. ¿Cuál tiene mayor energía: un fotón de luz infrarroja, de

32. Cuando los electrones en una sustancia hacen una tran-

luz visible o de luz ultravioleta?

sición particular de niveles de energía, se emite luz verde.

45. ¿La excitación atómica ocurre en los sólidos así como en

Si en vez de ello se emitiera luz azul de la misma sustan-

los gases? ¿Cómo es que la energía radiante de un sólido

cia, ¿correspondería a un mayor o a un menor cambio de

incandescente difiere de la energía radiante emitida por

energía en el átomo?

un gas excitado?

33. La luz ultravioleta causa quemaduras, mientras que la luz

46. Las lámparas de vapor de sodio de baja presión emiten

visible, incluso de mayor intensidad, no las produce.

espectros de líneas con longitudes de onda bien definidas,

¿Por qué?

pero las lámparas de vapor de sodio de alta presión emi-

34. Si duplicas la frecuencia de la luz, duplicas la energía de

ten luz cuyas líneas están más dispersas. Relaciona esto

cada uno de sus fotones. Si en vez de ello duplicas la lon-

con la mancha continua de longitudes de onda emitidas

gitud de onda de la luz, ¿qué ocurre con la energía de los

por los sólidos.

fotones?

47. El filamento de una lámpara está hecho de tungsteno.

35. ¿Por qué a una señal de neón al final no se le "agotan" los

¿Por qué se obtiene un espectro continuo en lugar de un

átomos que excitar y produce luz cada vez más tenue?

espectro de líneas de tungsteno cuando la luz de una lám-

36. Un investigador quiere que las líneas espectrales de un

para incandescente se ve con un espectroscopio?

espectro sean crecientes pequeños. ¿Qué cambio en

48. ¿Cómo es que un átomo de hidrógeno, que sólo tiene un

el espectroscopio logrará esto?

electrón, puede tener tantas líneas espectrales?

37. Si la luz pasara por un orificio redondo en lugar de una

49. Dado que un gas que absorbe reemite la luz que absorbe,

delgada rendija en un espectroscopio, ¿cómo aparecerían

¿por qué hay líneas oscuras en un espectro de absorción?

las "líneas" espectrales? ¿Cuál es el inconveniente de un

Esto es: ¿por qué la luz reemitida no sólo llena los lugares

orificio comparado con una rendija?

oscuros?

38. Si usas un prisma o una rejilla de difracción para compa-

50. Si los átomos de una sustancia absorben luz ultravioleta y

rar la luz roja de un tubo de neón común y la luz roja de

emiten luz roja, ¿en qué se convierte la energía "perdida"?

un láser helio-neón, ¿qué sorprendente diferencia verás?

51. (a) La luz proveniente de una fuente incandescente pasa

39. ¿Cuál es la evidencia que permite afirmar que hay hierro

a través de vapor de sodio y luego se examina con un

en la capa exterior relativamente fría del Sol?

espectroscopio. ¿Cuál es la apariencia del espectro? (b) La

40. ¿Cómo podrían distinguirse las líneas de Fraunhofer en

fuente incandescente se desconecta y el sodio se calienta

el espectro de la luz solar, que se deben a absorción en la

hasta que brilla. ¿Cómo se compara el espectro del sodio

atmósfera del Sol, de las debidas a la absorción por gases

calentado con el espectro observado antes?

en la atmósfera de la Tierra?

52. Tu amigo razona que si la luz ultravioleta puede activar el

41. ¿En qué forma específica la luz de las estrellas y las galaxias

proceso de fluorescencia, la luz infrarroja también debería

distantes dice a los astrónomos que los átomos en todo el

hacerlo. Tu amigo te mira en busca de tu aprobación o

universo tienen las mismas propiedades que en la Tierra?

desaprobación de esta idea. ¿Cuál es tu posición?

42. ¿Qué diferencia ve un astrónomo entre el espectro de

53. Cuando la luz ultravioleta cae sobre ciertos tintes, se

emisión de un elemento en una estrella que se aleja y un

emite luz visible. ¿Por qué no ocurre esto cuando luz

espectro del mismo elemento en el laboratorio? (Suge-

infrarroja cae sobre dichos tintes?

rencia: esto se relaciona con las mediciones de frecuencia

54. ¿Por qué las telas que tienen fluorescencia cuando se

para una fuente ondulatoria en movimiento.)

exponen a luz ultravioleta también brillan en la luz solar?

55. ¿Por qué diferentes minerales fluorescentes emiten dife-

72. Dado que todo objeto tiene una temperatura, todo objeto

rentes colores cuando se iluminan con luz ultravioleta?

irradia energía. ¿Por qué entonces no puedes ver los obje-

56. Algunas puertas tienen combinaciones de resorte y amor-

tos en la oscuridad?

tiguador para que cierren de manera lenta cuando se suel-

73. De vuelta al Capítulo 16, dado que todos los cuerpos

tan. ¿En qué se parece esto a la fosforescencia?

irradian energía, ¿por qué no todos los cuerpos se vuelven

57. Cuando ciertos materiales se iluminan con luz visible,

más fríos?

electrones saltan de los estados energéticos más bajos a los

74. Si continúas calentando un trozo de metal que en un

más altos en los átomos del material. Cuando se iluminan

inicio estaba a temperatura ambiente, en una habitación

con luz ultravioleta, los átomos se ionizan de modo que

oscura, comenzará a brillar visiblemente. ¿Cuál será su

algunos de ellos expulsan electrones. ¿Por qué los dos

primer color visible y por qué?

tipos de iluminación producen resultados tan diferentes?

75. ¿Cómo se comparan las temperaturas superficiales de las

58. Para mantener calientes a los pollos en un gallinero, ¿por

estrellas rojizas, azuladas y blancuzcas?

qué una CFL sería una mala elección comparada con una

76. El dibujo (a) muestra una curva de radiación de un sólido

bombilla incandescente?

incandescente. El dibujo (b) muestra la "curva de radia-

59. ¿Por qué los LED son las lámparas de elección en los

ción" de un gas excitado y su patrón espectral de emisión.

lugares difíciles de alcanzar, como los techos altos?

El dibujo (c) muestra la curva producida cuando un gas

60. ¿Qué color resulta cuando brillan juntos un LED rojo y

frío está entre una fuente incandescente y el observador;

uno verde?

el patrón espectral correspondiente se deja como ejercicio

61. Cita al menos dos razones para predecir que los LED a la

para que tú lo construyas. El dibujo (d) muestra el patrón

larga serán más populares que las CFL.

espectral de una fuente incandescente vista a través de un

62. El precursor del láser involucró microondas en lugar de

trozo de vidrio verde; tú debes dibujar la correspondiente

luz visible. ¿Qué significa la palabra máser?

curva de radiación.

63. El primer láser consistió en una barra de rubí rojo activa-

Rojo

Azul

da por una lámpara de destello que emitía luz verde. ¿Por

qué no funcionaría un láser compuesto con una barra de

cristal verde y una lámpara de destello que emita luz roja?

64. ¿Cómo es que las avalanchas de fotones en un haz láser difieren de las multitudes de fotones emitidos por una lámpara incandescente?

65. En el funcionamiento de un láser helio-neón, ¿por qué es

(a)

(b)

importante que el estado metaestable del helio sea relativamente de larga duración? (¿Cuál sería el efecto de que

?

este estado se desexcitara con mucha rapidez?) (Consulta la Figura 30.22.)

66. En el funcionamiento de un láser helio-neón, ¿por qué es

?

importante que el estado metaestable en el átomo de helio coincida lo más posible con el nivel de energía de un estado metaestable más difícil de alcanzar en el neón?

(c)

(d)

67. Un amigo especula que los científicos de un determinado país crearon un láser que produce mucha más energía

77. Los elementos en la superficie del Sol se revelan en el de la que se pone en él y pide tu opinión. ¿Cuál es tu espectro solar. ¿Las líneas en el espectro son las de emi-

respuesta?

sión o las de absorción?

68. Un láser no puede producir más energía de la que se pone

78. Considera sólo cuatro de los niveles de energía de un

en él. Sin embargo, un láser puede producir pulsos de

átomo determinado, como se muestra en el diagrama de

luz que tienen más salida de potencia que la potencia de

abajo. ¿Cuántas líneas espectrales resultarán de todas las

entrada necesaria para que funcione el láser. Explica.

posibles transiciones entre estos niveles? ¿Cuál transición

69. En la ecuación f ~ T, ¿qué representan los símbolos f y T?

corresponde a la luz emitida con frecuencia más alta? ¿A

70. Se sabe que el filamento de una lámpara incandescente

la luz emitida con frecuencia más baja?

a 2,500 K irradia luz blanca. ¿El filamento de la lám-

$n = 4$

para también irradia energía cuando está a temperatura

$n = 3$

ambiente?

$n = 2$

71. Se sabe que el Sol irradia energía. ¿La Tierra igualmen-

te irradia energía? Si es así, ¿cuál es la diferencia en sus

radiaciones?

$n = 1$

79. Un electrón se desexcita desde el cuarto nivel cuántico

80. Para la transición descrita en el ejercicio anterior, ¿hay

del diagrama de la pregunta anterior hacia el tercero, y

alguna relación entre las longitudes de onda de los foto-

luego directamente hacia el estado base. Se emiten dos

nes emitidos?

fotones. ¿Cómo se compara la suma de sus frecuencias

81. Supón que los cuatro niveles de energía en la pregunta 78

con la frecuencia del fotón individual que se emitiría por

de algún modo estuvieran igualmente espaciados. ¿Cuán-

la desexcitación desde el cuarto nivel directamente hasta

tas líneas espectrales resultarían?

el estado base?

P I E N S A Y D I S C U T E (E V A L U A C I Ó N)

82. Un láser de laboratorio tiene una potencia de sólo

85. Si ves una estrella "al rojo violeta", puedes estar seguro de

0.8 mW, 8 3 1024 W. ¿Por qué parece más poderoso que

que su intensidad pico está en el rango ultravioleta. ¿Por

la luz proveniente de una lámpara de 100 W?

qué esto es así?

83. Puedes calentar un pedazo de metal al rojo vivo y luego al

86. Una estrella "al rojo verde" se percibe no como

rojo blanco. ¿Puedes calentarlo hasta que el metal bril e azul?

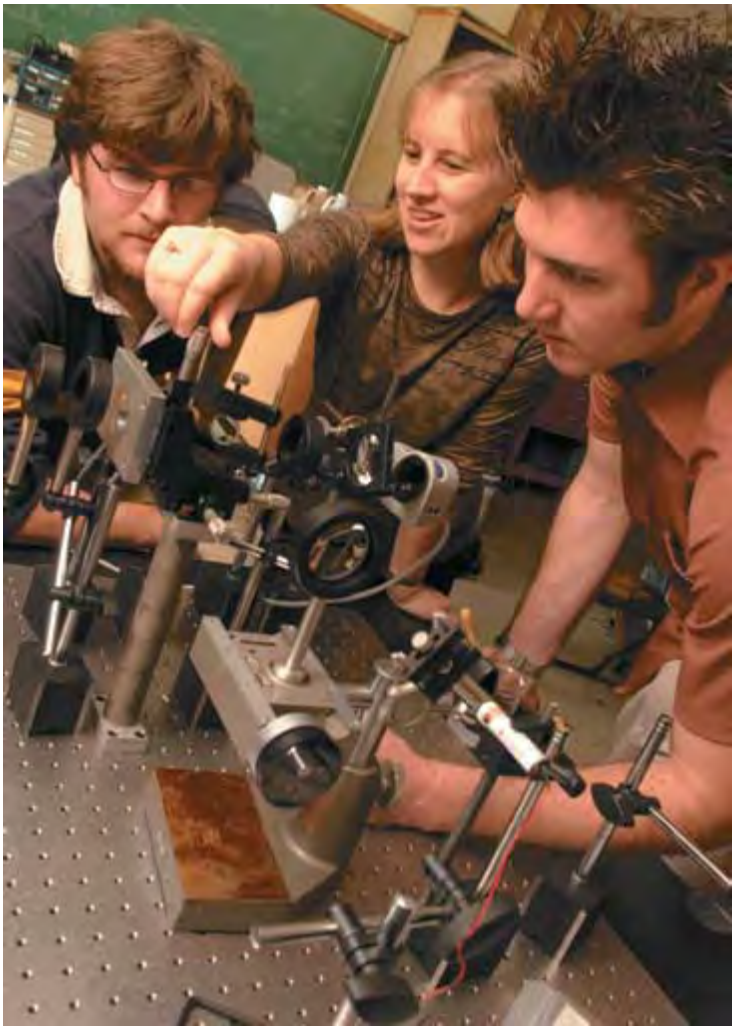
verde, sino como blanca. ¿Por qué? (Sugerencia: conside-

84. Si ves una estrella roja, puedes estar seguro de que su inten-

ra la curva de radiación de las Figuras 27.7 y 27.8, y la

sidad pico está en la región infrarroja. ¿Por qué esto es así?

Figura 30.7.)



31 1

C A P Í T U L O 3 1

Cuantos de luz 2

3

31.1 El nacimiento de la teoría cuántica

31.2 Cuantización y la constante de Planck

31.3 Efecto fotoeléctrico

31.4 Dualidad onda-partícula

31.5 Experimento de la doble rendija

31.6 Partículas como ondas: difracción

de electrones

4

31.7 Principio de incertidumbre

31.8 Complementariedad

1 Phil Wolf, coautor de Resolución de problemas en Física conceptual, dirige luz de diferentes frecuencias sobre una fotocelda y mide las energías de los electrones expulsados para demostrar el efecto

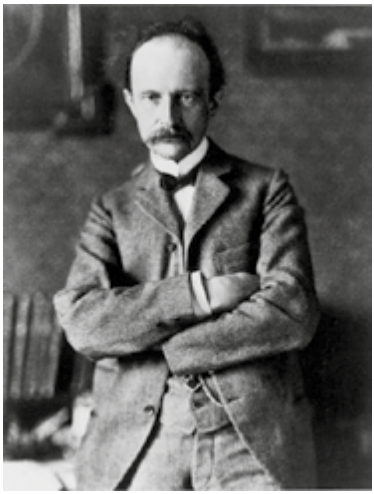
fotoeléctrico. 2 Físicos ocupados en el centro de control del Sincrotrón Súper Protón del CERN en Francia, en la frontera suiza

cerca de Ginebra. El centro de control combina las salas de control

de los ocho aceleradores del laboratorio. 3 Anne Cox, coautora de Physlet Quantum Physics, alinea unas pinzas ópticas con sus

estudiantes en el Eckerd College, de Florida. 4 Gary Williams explica el funcionamiento de una cámara de seguridad infrarroja a

su audiencia en el Reino Unido.



propuso no sólo que la energía se agrega a la luz en unidades cuánticas, sino también que la propia luz existe como bul -

Durante su juventud en Alemania, Max Planck fue un músico talentoso. Cantaba, tocaba instrumen-

tos musicales y compuso canciones y óperas. Sin tos cuánticos, o "corpúsculos", más tarde llamados fotones.

embargo, en lugar de estudiar música, decidió estudiar físi-

En reconocimiento por la introducción del cuanto,

ca, y obtuvo su doctorado en 1879,

Planck recibió el Premio Nobel de Física en 1918. Es muy

cuando tenía 21 años de edad. En la

interesante que el mismo Planck nunca haya aceptado la idea

época, las dos grandes teorías de del fotón. En 1912, en una injuria clásica, Planck escribió la física que se seguían activamente

que, debido a otros logros, Einstein merecía ser miembro de

eran la termodinámica, el estudio la Academia Prusiana de Ciencias, a pesar de haber errado el del calor, y el electromagnetismo, el

camino al proponer un corpúsculo de luz.

estudio de la radiación. Planck no

Plank tuvo hijas gemelas, Emma y Grete, y dos varones,

imaginaba que, al tratar de combi-

Karl y Erwin. Durante la Primera Guerra Mundial, el menor

nar estos dos campos, daría inicio a

de sus hijos, Erwin, fue tomado prisionero por los franceses

toda una física nueva del siglo XX:

en 1914, y su hijo mayor, Karl, murió en combate en Verdún.

la mecánica cuántica.

Poco después, con dos años de diferencia, ambas hijas murie-

En 1900 había preguntas intrigantes sobre la radiación de

ron mientras daban a luz. Planck soportó estas pérdidas de

la energía térmica que seguían sin responderse. La forma en la

un modo estoico.

que la energía de la radiación térmica se distribuía sobre dife-

Cuando Hitler llegó al poder en 1933, Planck al princi-

rentes frecuencias se había medido de manera cuidadosa, pio esperaba que el nazismo fuera una desgracia temporal, pero nadie había podido ofrecer una teoría que explicara los

pero con el tiempo mostró su aversión por el plan nazi, y en

resultados. Con la esperanza de proporcionar una respuesta

1938, como protesta, renunció a la presidencia de la Acade-

teórica, Planck, a la "avanzada" edad de 42 años, planteó mia Prusiana. En 1944, en el periodo álgido de la Segunda una hipótesis que llamó "un acto de desesperación". Propu -

Guerra Mundial, la casa de Planck en Berlín fue bombar-

so que, cuando un objeto caliente emite energía radiante, deada y destruida completamente por los aliados. En el pierde energía no de manera continua sino en cantidades mismo año, su hijo Erwin fue implicado en el intento de discretas, o bultos, que él denominó cuantos. Además, pos-homicidio de Hitler en el famoso complot del 20 de julio.

tuló que el cuanto de energía que se irradia es proporcional

Aunque se dice que Erwin podía haber sido perdonado si

a la frecuencia de la radiación. Con esta teoría, Planck podía

Planck se hubiera unido al partido nazi, Planck se opuso

explicar cómo la energía en la radiación térmica se distri-

y rehusó unirse. Erwin fue colgado a principios de 1945,

buía sobre diferentes frecuencias. Cinco años después, Eins-

lo que devastó a su anciano padre. Planck murió dos años

tein (entonces de 26 años de edad) dio el siguiente paso y

después, en 1947, a los 89 años de edad.

31.1 El nacimiento de la teoría cuántica

La física clásica que has estudiado hasta el momento trata con dos categorías de fenómenos: partículas y ondas. De acuerdo con las leyes de Newton, las "partículas" son pequeños objetos como balas que tienen masa y viajan por el espacio en líneas rectas a menos que sobre ellos actúe una fuerza. Del mismo modo, las "ondas", como las del sonido o las del océano, son fenómenos que se extienden en el espacio. Cuando una SCREENCAST: El mundo cuántico

onda viaja a través de una abertura o alrededor de una barrera, la onda se difracta y diferentes partes de la onda interfieren. Por tanto, partículas y ondas son fáciles de distinguir unas de otras. De hecho, tienen propiedades que son mutuamente excluyentes.

No obstante, la cuestión de cómo clasificar la luz fue un misterio durante siglos.

Una de las primeras teorías de la naturaleza de la luz es la de Platón, quien vivió en los siglos V y IV antes de nuestra era. Platón

pensaba que la luz consistía en serpentinas emitidas por el ojo. Euclides, quien vivió aproximadamente un siglo después, también sostuvo esta idea. Por otra parte, los pitagóricos creían que la luz emanaba de los cuerpos luminosos en forma de partículas muy finas, en tanto que Empédocles, un predecesor de Platón, enseñaba que la luz se componía de ondas de algún tipo que viajaban con gran rapidez. Durante más de 2,000 años la pregunta siguió sin responderse. ¿La luz consiste en ondas o en partículas?

PA R T E SEI S

LU Z

En 1704, Isaac Newton describió la luz como un chorro de partículas. Sostuvo esta idea a pesar de conocer lo que ahora se denomina polarización y a pesar de su experimento con la luz que se refleja sobre placas de vidrio, en el cual observó franjas de claridad y oscuridad (anillos de Newton). Sabía que sus partículas de luz también debían tener ciertas propiedades ondulatorias. Christian Huygens, contemporáneo de Newton, defendió una teoría ondulatoria de la luz.

Con toda esta historia como contexto, Thomas Young, en 1801, realizó el "experimento de la doble rendija", el cual pareció demostrar, al fin, que la luz es un fenómeno ondulatorio. Esta idea se reforzó en 1862, con la predicción de Maxwell de que la luz porta energía en los campos eléctrico y magnético oscilatorios. Veinticinco años después, Heinrich Hertz utilizó unos geniales circuitos eléctricos para demostrar la realidad de las ondas electromagnéticas (de radiofrecuencia). Como se mencionó antes, Max Planck, en 1900, planteó la hipótesis de que la energía radiante se emite en paquetes discretos, cada uno de los cuales llamó cuanto. De acuerdo con Planck, la energía en cada paquete de energía es proporcional a la

frecuencia de radiación (E ~ f , que se presentó en el Capítulo 30). Su hipótesis dio inicio a una revolución de ideas que cambió por completo la forma de pensar en el mundo físico. La hipótesis de Planck adquirió credibilidad en 1905, cuando Albert Einstein publicó un ensayo ganador del Premio Nobel que ponía en duda la teoría ondulatoria de la luz al argumentar que la luz interactuaba con la materia, no en forma de ondas continuas como vislumbró Maxwell, sino en forma de pequeños paquetes de energía como sugería Planck, y a los que ahora se les denomina fotones. En términos generales, al conjunto de leyes plantea-das desde 1900 hasta finales de la década de 1920, que describe todos los fenómenos cuánticos del micromundo, se le conoce como física cuántica.

31.2 Cuantización y la constante de Planck

La cuantización, la idea de que el mundo natural es granular en lugar de continuamente liso, por supuesto que no es una idea nueva en la física. La materia está cuantizada; la masa de un lingote de oro, por ejemplo, es igual a cierto múltiplo entero de la masa de un solo átomo de oro. La electricidad está cuantizada, ya que la carga eléctrica siempre SCREENCAST: La constante

es un múltiplo entero de la carga de un solo electrón.

de Planck y los fotones

La física cuántica afirma que, en el micromundo del átomo, la cantidad de energía en cualquier sistema está cuantizada: no todos los valores de energía son posibles. Esto es lo mismo que decir que una fogata sólo puede tener determinado calor. Puede arder a 450 C o puede arder a 451 C, pero no puede arder a 450.5 C. ¿Lo crees? Bueno, no deberías, porque, hasta donde pueden medir los termómetros macroscópicos, una fogata puede arder a cualquier temperatura en tanto esté por arriba de la temperatura mínima que se necesita para la combustión. Pero es muy interesante que la energía de la fogata sea la energía compuesta de un gran número, y una gran diversidad, de unidades elementales de energía. Un ejemplo más sencillo es la energía de un haz de luz láser, que es un múltiplo entero de un solo valor más bajo de energía: un cuanto. Los cuantos de luz, y de la radiación electromagnética en general, son los fotones.

Recuerda del Capítulo 30 que la energía de un fotón está dada por E 5 hf , donde h es la constante de Planck (el número que resulta cuando la energía de un fotón se divide entre su frecuencia).1 Verás

que la constante de Planck es una constante fundamental de la naturaleza que sirve para establecer un límite inferior a la pequeñez de las cosas. Se clasifica, junto con la velocidad de la luz y la constante gravitacional de Newton, como una constante básica de la naturaleza, y aparece una y otra vez en la física cuántica. La ecuación E 5 hf proporciona la cantidad más pequeña de energía que puede convertirse en luz con frecuencia f. La radiación de la luz no se emite de manera continua, sino como un chorro de fotones, donde cada fotón palpita con una frecuencia f y porta una energía hf.

1La constante de Planck, h, tiene el valor numérico 6.6 3 10234 J?s.

La ecuación E 5 hf dice por qué la radiación de microondas no puede causar el daño a las moléculas de las células vivas que sí puede causar la luz ultravioleta y los rayos X.

La radiación electromagnética interactúa con la materia sólo en

paquetes discretos de fotones. De modo que la frecuencia relativamente baja de las microondas asegura una baja energía por fotón. Los fotones ultravioleta, por otra parte, pueden suministrar alrededor de un mil ón de veces más energía a una molécula debido a que la frecuencia de la radiación ultravioleta es más o menos un mil ón de veces mayor que la frecuencia de las microondas. Los rayos X, con frecuencias incluso mayores, pueden suministrar aún más.

La física cuántica te dice que el mundo físico es un lugar áspero y granuloso. El mundo del "sentido común" descrito por la física clásica parece liso y continuo porque la granulosidad cuántica está en una escala muy pequeña comparada con los tamaños de las cosas en el mundo familiar. La constante de Planck es pequeña en términos de unidades familiares. Pero no tienes que entrar en el mundo cuántico para encontrar la granulosidad que subyace a la aparente suavidad. Por ejemplo, las áreas donde se mezclan el negro, el blanco y el gris en la fotografía de Max Planck al comienzo de este capítulo y otras fotografías de este libro, no parecen lisas en absoluto cuando las Los cuantos de luz, los electrones

y otras partículas se comportan

ves con una lupa. Con la amplificación, puedes ver que una fotografía impresa consiste como si fueran paquetes en algu-en muchos puntos pequeños. En forma similar, vives en un mundo que es una imagen nos aspectos y ondas en otros.

borrosa del granuloso mundo de los átomos.

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Qué significa el término cuanto?

2. ¿Cuánta energía total hay en un haz monocromático compuesto de n

fotones de frecuencia f?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. Un cuanto es la unidad elemental más pequeña de una cantidad. La energía radiante, por ejemplo, está compuesta de muchos cuantos, cada uno de los cuales se llama fotón. De modo que mientras más fotones tenga un haz de luz, más energía habrá en el haz.

2. La energía en un haz de luz monocromática que contiene n cuantos es E 5 nhf.

31.3 Efecto fotoeléctrico

A finales del siglo XIX, muchos investigadores observaron que la luz podía expulsar electrones de varias superficies metálicas. Esto es el efecto fotoeléctrico, usado durante muchos años en los ojos eléctricos, en los exposímetros de los fotógrafos y, antes de la era digital, en las pistas sonoras de las películas. Una extensión del efecto fotoeléctrico está en las actuales celdas eléctricas fotovoltaicas y su potencial para ser una de las SCREENCAST: Efecto fotoeléctrico

principales fuentes de energía.

En la Figura 31.1 se muestra un montaje para observar el efecto fotoeléctrico. La luz que alumbra sobre la superficie metálica fotosensible, con carga negativa, libera electrones. Los electrones liberados son atraídos hacia la placa positiva y producen una corriente mensurable. Si en vez de ello la placa se carga apenas con la carga negativa suficiente para repeler electrones, la corriente puede detenerse. Entonces pueden calcularse las energías de los electrones expulsados por la diferencia de potencial fácilmente medible entre las placas.

El efecto fotoeléctrico no fue particularmente sorprendente para los primeros investigadores. La expulsión de electrones podría explicarse mediante la física clásica, que

F I G U R A 3 1 . 1

Un aparato usado para observar el

efecto fotoeléctrico. Invertir la polari-

La luz expulsa

dad y detener el flujo de electrones es

electrones

una manera de medir la energía de los

aquí

electrones.

Los electrones son atraídos

+ y recolectados aquí

Vacío

El medidor indica

–

+

flujo de electrones

Batería

La luz expulsa

representa las ondas de luz incidente que se acumulan en la vibración de un electrón electrones

hacia amplitudes cada vez mayores hasta que finalmente se desprenden de la superficie metálica, tal como las moléculas de agua se liberan de la superficie del agua caliente.

Se necesitaría mucho tiempo para que una fuente de luz débil cediera a los electrones de un metal suficiente energía para hacer que se desprendan de la superficie. En vez de ello, se descubrió que los electrones son expulsados en cuanto la luz se enciende, pero no se expulsan tantos como con una fuente de luz más intensa. Un examen cuidadoso Más luz expulsa

del efecto fotoeléctrico condujo a varias observaciones que eran contrarias a la imagen más electrones

ondulatoria clásica:

con la misma

energía cinética

1. El retraso temporal que hay entre el encendido de la luz y la expulsión de los primeros electrones no era afectada por la intensidad o la frecuencia de la luz.

2. El efecto era fácil de observar con luz violeta o ultravioleta, mas no con luz roja.

3. La tasa a la que se expulsan los electrones era proporcional a la intensidad de la luz.

4. La energía máxima de los electrones expulsados no era afectada por la inten-F I G U R A 3 1 . 2

sidad de la luz. Sin embargo, había indicios de que la energía del electrón sí El efecto fotoeléctrico depende de la

dependía de la frecuencia de la luz.

intensidad.

La ausencia de un retraso temporal considerable era especialmente difícil de entender en términos de la imagen ondulatoria. De acuerdo con la teoría ondulatoria, un electrón en luz tenue debe, después de cierta demora, acumular suficiente energía vibratoria para salir volando, mientras que un electrón en luz brillante debería expulsarse casi de inmediato. Sin embargo, esto no ocurría. No era extraño observar un electrón que se expulsaba de inmediato, incluso bajo la luz más débil. Observar que La luz de baja

la intensidad de la luz en ninguna forma afectaba las energías de los electrones ex-frecuencia no

pulsados también era desconcertante. Los campos eléctricos más intensos de luz más expulsa

electrones

brillante no hacían que los electrones se expulsaran con mayor rapidez. Más electrones se expulsaban con luz más brillante, pero no con rapideces mayores. Por otra parte, un haz débil de luz ultravioleta producía un número menor de electrones expulsados, pero con rapideces mucho mayores. Esto era muy desconcertante.

Einstein ofreció la respuesta en 1905, el mismo año en que explicó el movimiento La luz de alta

browniano y describió su teoría de la relatividad especial. Su clave fue la teoría de frecuencia sí expulsa

radiación cuántica de Planck. Debido a que Planck había supuesto que la emisión electrones

de luz en cuantos se debía a restricciones en los átomos vibratorios que producían la luz. Esto es: Planck supuso que la energía en la materia está cuantizada, pero que la energía radiante es continua. Einstein, por otra parte, atribuyó propiedades cuánticas a la propia luz y vio la radiación como una lluvia de partículas. Este aspecto corpuscular (de partícula) se pone de manifiesto cuando se habla de fotones (en analogía F I G U R A 3 1 . 3

con los electrones, protones y neutrones). Un fotón es absorbido por completo por El efecto fotoeléctrico depende de la

cada electrón expulsado del metal. La absorción es un proceso absoluto y es inme-frecuencia.

diato, de modo que no hay un retraso mientras se acumulan "energías ondulatorias".

Una onda de luz tiene un frente amplio, y su energía se dispersa a lo largo de este frente. Para que la onda de luz expulse un solo electrón de una superficie metálica, toda su energía de algún modo tendría que estar concentrada en dicho electrón. Pero esto es tan improbable

como una ola en el océano que golpea una roca muy dentro de tierra firme con una energía igual a la de toda la ola. Por tanto, en vez de pensar que la luz encuentra una superficie como un tren continuo de ondas, el efecto fotoeléctrico sugiere concebir que la luz encuentra una superficie o cualquier detector como una sucesión de partículas: fotones. El número de fotones en un haz de luz afecta la intensidad de todo el haz, en tanto que la frecuencia de la luz controla la energía de cada fotón individual.

Los electrones se sostienen en un metal mediante fuerzas eléctricas de atracción.

Para que un electrón deje la superficie se necesita una energía mínima, denominada función de trabajo, W 0. Un fotón de frecuencia baja con energía menor que W 0 no producirá la expulsión de electrones. Sólo un fotón con energía mayor que W 0 resulta en el efecto fotoeléctrico. Por ende, la energía del fotón incidente será igual a la energía cinética saliente del electrón más la energía necesaria para sacarlo del metal, W 0.

Once años después, el físico estadounidense Robert Millikan demostró, con una verificación experimental, la explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico. Resulta interesante que Millikan haya pasado unos 10 años intentando desaprobar la teoría de Einstein del fotón, sólo para convencerse de ella a consecuencia de sus propios experimentos, por lo que ganó un Premio Nobel. Todos los aspectos de la interpretación de Einstein se confirmaron, incluso la proporcionalidad directa de la energía fotónica y la frecuencia. Fue por esto (y no por su teoría de la relatividad) que Einstein recibió su Premio Nobel. Sorprendentemente, no fue sino hasta 1923, y con el descubrimiento de otras evidencias cuánticas, que los físicos aceptaron en general la existencia del fotón.

El efecto fotoeléctrico demuestra de manera concluyente que la luz tiene propiedades de partícula. El efecto fotoeléctrico no puede concebirse con base en las ondas. Por otra parte, se ha visto que el fenómeno de la interferencia demuestra de un modo convincente que la luz tiene propiedades ondulatorias. No se puede concebir la interferencia en términos de partículas. En la física clásica esto es contradictorio.

Desde el punto de vista de la física cuántica, la luz tiene propiedades que recuerdan a ambos. Es "como una onda" o "como una partícula", dependiendo del experimento particular. De modo que la luz se considera ambos, una onda-partícula. ¿Qué tal una

“ondícula”? La física cuántica necesita una nueva forma de pensar.

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Una luz más brillante expulsará más electrones desde una superficie fotosensible que una luz más tenue de la misma frecuencia?

2. ¿Una luz de frecuencia alta expulsará un mayor número de electrones que una luz con frecuencia baja?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. Sí. El número de electrones expulsados depende del número de fotones incidentes.

2. No necesariamente. La energía (no el número) de los electrones expulsados depende de la frecuencia de los fotones que alumbran. Una fuente brillante de luz azul, por ejemplo, puede expulsar más electrones a una energía más baja que una fuente violeta tenue.

F I G U R A 3 1 . 4

Las celdas solares SunPower sobre el techo del Exploratorium de San Francisco utilizan el efecto fotoeléctrico para satisfacer todas sus demandas de electricidad. Los electrones energizados, en lugar de expulsarse de la superficie, permanecen dentro del material para crear una corriente. Las celdas generan 1.4 megawatts de CD, que se convierten en 1.3 megawatts de CA para usar en el edificio.

31.4 Dualidad onda-partícula

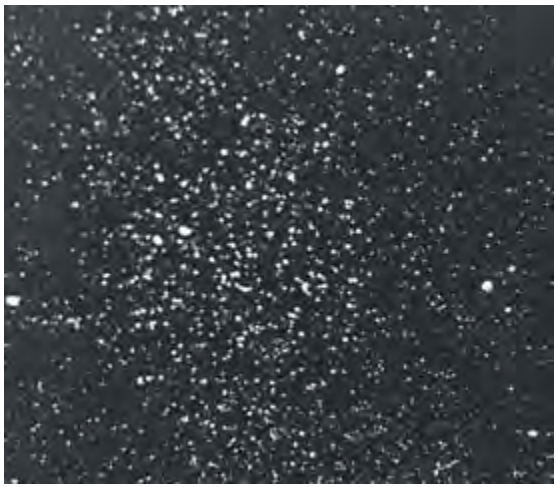
La naturaleza de onda y partícula de la luz es evidente en la formación de imágenes ópticas. La imagen fotográfica producida por una cámara se entiende en términos de ondas de luz, que se dispersan desde cada punto del objeto, se refractan conforme pasan a través del sistema de lentes y convergen para enfocarse sobre el medio de registro sensible a la luz, ya sea una película fotográfica o, en una cámara digital, un detector electrónico. La trayectoria de la luz desde el objeto a través del sistema de lentes y hacia el plano focal puede calcularse con el uso de métodos desarrollados a partir de la teoría ondulatoria de la luz.

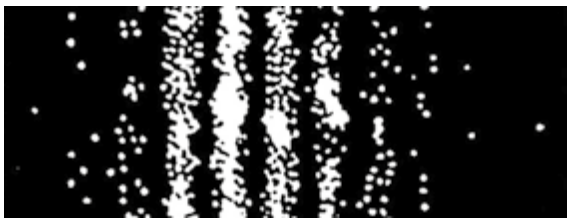
Pero ahora piensa cuidadosamente en la manera como se forma una imagen sobre la película fotográfica. La película consiste en una emulsión que contiene granos de cristal de haluro de plata, y cada grano contiene alrededor de 1010 átomos de plata. Cada fotón que se absorbe cede su energía, hf, a un solo grano en la emulsión. Esta energía activa los cristales circundantes en todo el grano y se usa en el revelado para completar el proceso fotoquímico. Muchos fotones que activan muchos granos producen la exposición fotográfica habitual. Cuando una fotografía se toma con luz excesivamente débil, se observa que la imagen se constituye de fotones individuales que llegan de manera independiente y parecen tener una distribución

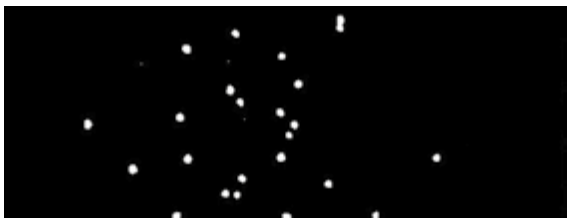
aleatoria. Esto se ilustra de un modo espectacular en la Figura 31.5, que muestra cómo avanza una exposición fotón por fotón.

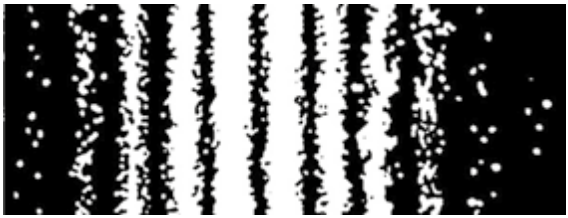
31.5 Experimento de la doble rendija

Regresa al experimento de la doble rendija de Thomas Young, que estudiaste en términos de ondas en el Capítulo 29. Recuerda que, cuando luz monocromática pasa por un par de delgadas rendijas estrechamente espaciadas, se produce un patrón de interferencia (Figura 31.6). Ahora considera el experimento en términos de fotones. Supón que atenúas la fuente de luz de modo que, en efecto, sólo un fotón a la vez llega a la barrera con las rendijas delgadas. Si la película detrás de la barrera se expone a la luz durante un tiempo muy corto, la película se expone como se simula en la Figura 31.7a. Cada mancha representa el lugar donde la película se expuso por un fotón. Si se permite que la película se exponga a la luz durante un tiempo más largo, comienza a surgir un patrón de franjas, como en las Figuras 31.7b y 31.7c. ¡Esto es muy sorprendente! ¡Se ve cómo las manchas sobre la película avanzan, fotón por fotón, para formar el mismo patrón de interferencia caracterizado por las ondas!









(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

F I G U R A 3 1 . 5

Etapas de la exposición de una película que revelan la producción fotón a fotón de una fotografía.

Los números aproximados de fotones en cada etapa son (a) 3 3 103, (b) 1.2 3 104, (c) 9.3 3 104, (d) 7.6 3 105, (e) 3.6 3 106, y (f) 2.8 3 107.

F I G U R A 3 1 . 6

Película

(a) Montaje para el experimento de la

Doble

fotográfica

doble rendija. (b) Fotografía del patrón

rendija

de interferencia. (c) Representación

gráfica del patrón.

Fuente

de luz

Luz

Láser

(a)

(b)

(c)

(a)

(b)

(c)

F I G U R A 3 1 . 7

Etapas del patrón de interferencia de la doble rendija. El patrón de granos expuestos individual-mente avanza de (a) 28 fotones a (b) 1,000 fotones a (c) 10,000 fotones. Conforme más fotones golpeen la pantalla, aparecerá un patrón de franjas de interferencia.

590

PA R T E SEI S

LU Z

Si cubres una rendija de modo que los fotones que golpeen la película fotográfica puedan pasar sólo por una rendija, las pequeñas manchas sobre la película se acumulan y forman un patrón de difracción de una sola rendija (Figura 31.8). ¡Se descubre que los fotones golpean la película en lugares que no golpearían si ambas rendijas estuvie-F I G U R A 3 1 . 8

ran abiertas! Si pensaras en esto desde un punto de vista clásico, quedarías perplejo y Patrón de difracción de una sola rendija.

podrías preguntar cómo los fotones que pasan por la única rendija "saben" que la otra rendija está cubierta y, por tanto, forman un abanico para producir el ancho patrón de difracción de una sola rendija. O, si ambas rendijas están abiertas, ¿cómo los fotones que viajan a través de una rendija "saben" que la otra rendija está abierta y evitan ciertas regiones, y sólo avanzan hacia áreas que a final de cuentas llenarán para formar el patrón de interferencia de bandas de doble rendija?2 La respuesta moderna es que la naturaleza ondulatoria de la luz no es una propiedad promedio determinada que sólo aparece cuando muchos fotones actúan en conjunto. Cada fotón tiene propiedades La luz viaja como una onda y

ondulatorias, así como propiedades de partícula. Pero el fotón despliega diferentes golpea como una partícula.

aspectos en distintos momentos. Un fotón se comporta como partícula cuando se emite por un átomo o lo absorbe una película fotográfica u otro detector, y se comporta como onda cuando viaja de una fuente al lugar donde se detecta. De modo que el fotón golpea la película como una partícula pero viaja a su posición como una onda que interfiere de manera constructiva. El hecho de que la luz presente comportamientos tanto de onda como de partícula fue una de las interesantes sorpresas de principios del siglo XX.

Incluso más sorprendente fue el descubrimiento de que los objetos con masa también muestran un comportamiento dual onda-partícula.

31.6 Partículas como ondas: difracción de electrones

Si un fotón de luz tiene propiedades tanto de onda como de partícula, ¿por qué una partícula material (una con masa) no tiene también propiedades tanto de onda como de partícula? Esta pregunta se la planteó el físico francés Louis de Broglie cuando todavía era un estudiante de posgrado en 1924. Su respuesta constituyó su tesis doctoral en física, que luego le hizo acreedor al Premio Nobel de Física. De acuerdo con De Broglie, toda partícula de materia está dotada, de alguna forma, con una onda para guiarla mientras viaja. Entonces, bajo las condiciones adecuadas, toda partícula producirá un patrón de interferencia o de difracción. Todo cuerpo (ya sea un electrón, un protón, un átomo, un ratón, tú, un planeta, una estrella) tiene una longitud de onda que se relaciona con su cantidad de movimiento mediante

Louis De Broglie (1892–1987)

Longitud de onda =

h

cantidad de movimiento

donde h es la constante de Planck. Un cuerpo con masa grande y rapidez ordinaria tiene una longitud de onda tan pequeña que la interferencia y la difracción son despreciables; las balas de los fusiles vuelan recto y no acribillan a sus blancos en toda su
SCREENCAST: Difracción

extensión con parches de interferencia detectables.3 Pero, en el caso de partículas más de partículas

pequeñas, como los electrones, la difracción puede ser considerable.

2Desde un punto de vista precuántico, esta dualidad onda-partícula de hecho es misteriosa. Esto condujo a algunas personas a creer que los cuantos tienen una especie de conciencia, que cada fotón o electrón tiene "una mente propia". Sin embargo, el misterio es como la belleza. Está en la mente de quien la observa y no en la naturaleza en sí. Los científicos proponen modelos para comprender la naturaleza y, cuando surgen inconsistencias, se mejoran o cambian los modelos. La dualidad onda-partícula de la luz no encaja en un modelo construido sobre ideas clásicas. Otro modelo es que los cuantos tienen mentes propias. Otro modelo es la física cuántica.

En este libro se está de acuerdo con la última.

3Una bala de 0.02 kg de masa que viaja a 330 m/s, por ejemplo, tiene una longitud de onda de De Broglie cuyo h

6.6×-34

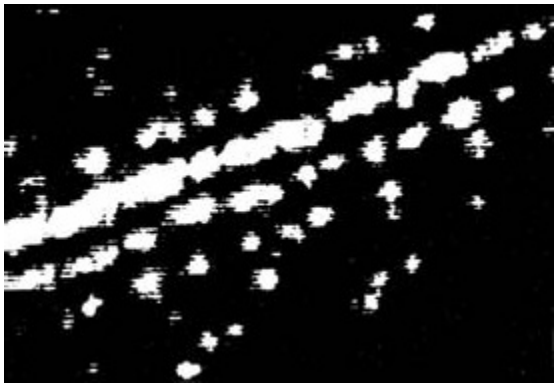
$=$

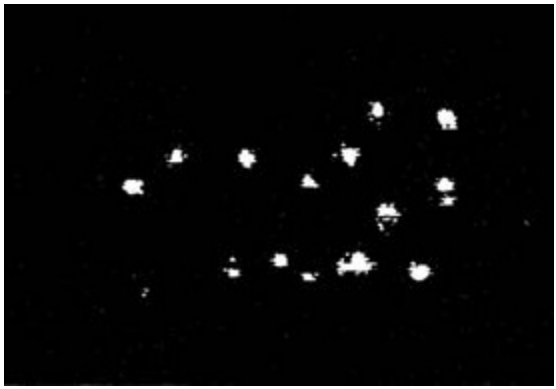
$10\ J{\cdot}s = -$

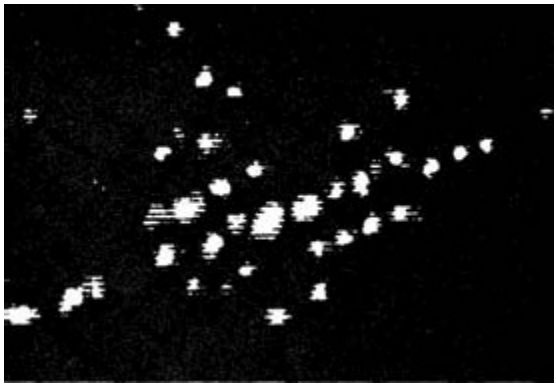
10 34m

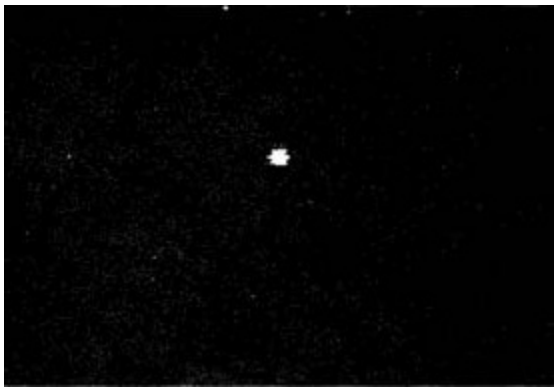
mv (0.02 kg)(330 m/s)

tamaño es increíblemente pequeño, un millón de millón de millón de millonésima del tamaño de un átomo de hidrógeno. Por otra parte, un electrón que viaja a 2% de la rapidez de la luz tiene una longitud de onda de 1010 m, que es igual al diámetro del átomo de hidrógeno. Los efectos de la difracción para los electrones son mensurables, en tanto que los efectos de la difracción para las balas no lo son.









F I G U R A 3 1 . 9

Franjas producidas por la difracción de

la luz.

Tanto un haz de electrones como un haz de fotones pueden difractarse de la misma forma. Los haces de electrones dirigidos a través de rendijas dobles también presentan patrones de interferencia similares a los de la Figura 31.9. El experimento de la doble rendija estudiado en la sección anterior puede realizarse con electrones, así como con fotones. Para los electrones el aparato es más complejo, pero el procedimiento es en esencia el mismo. La intensidad de la fuente puede reducirse para dirigir los electrones uno a la vez a través de un montaje de doble rendija, lo que produce los mismos resultados sorprendentes que con los fotones. Al igual que los fotones, los electrones golpean la pantalla como si fueran partículas, pero el patrón de llegada es como el de una onda. La desviación

angular de los electrones para formar el patrón de interferencia coincide perfectamente con los cálculos que utilizan la ecuación de De Broglie para la longitud de onda de un electrón.

En la Figura 31.11 se ve otro ejemplo de difracción de electrones, con el uso de un microscopio electrónico estándar. El haz de electrones con una densidad de corriente muy baja se dirige a través de un biprisma electrostático que difracta el haz. Un patrón F I G U R A 3 1 . 1 0

El microscopio electrónico le da un uso práctico a la naturaleza ondulatoria de los electrones. La longitud de onda del haz de electrones por lo general es miles de veces más corta que la longitud de onda de la luz visible, de modo que el microscopio electrónico puede distinguir detalles que no son visibles con los microscopios ópticos.

F I G U R A 3 1 . 1 1

Patrones de interferencia electrónica grabados de un monitor de televisión, que muestran la difracción de un haz de electrones de muy baja intensidad a través de un biprisma electrostático.

592

PA R T E SEI S

LU Z

P U N T O D E C O N T R O L

Rendijas

Electrones

1. Si los electrones se comportaran sólo como

partículas, ¿qué patrón esperarías sobre

la pantalla después de que los electrones

Pantalla

pasaran por la doble rendija?

fluorescente

2. No percibes la longitud de onda de De Broglie para una pelota de béisbol lanzada. ¿Esto se debe a que la longitud de onda es muy grande o a que es muy pequeña?

3. Si un electrón y un protón tienen la misma longitud de onda de De Broglie, ¿cuál partícula tiene mayor rapidez?

F I G U R A 3 1 . 1 2

Detalle de la cabeza de un mosqui-

to hembra visto con un microscopio

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S TA S

electrónico de barrido a una “baja”

1. Si los electrones se comportaran sólo

amplificación de 2003.

como partículas, formarían dos ban -

das, como se indica en (a). Debido a su

naturaleza ondulatoria, en realidad pro-

(a)

(b)

ducen el patrón que se muestra en (b).

2. Uno no percibe la longitud de onda de una pelota de béisbol lanzada porque es en extremo pequeña, unas 1020 veces más pequeña que el núcleo atómico.

3. La misma longitud de onda significa que las dos partículas tienen la misma cantidad de movimiento. Esto significa que el electrón que es menos masivo debe viajar más rápido que el protón que es más pesado.

de franjas producidas por cada uno de los electrones se acumula paso a paso y se muestra en un monitor de televisión. La imagen se llena de manera gradual con electrones y produce el patrón de interferencia que suele asociarse a las ondas. La dualidad onda-partícula no se limita a fotones y electrones. Neutrones, protones, átomos enteros y, en un grado incalculable, incluso las balas de un fusil con gran rapidez muestran una dualidad de comportamiento de partícula y de onda.

31.7 Principio de incertidumbre

La dualidad onda-partícula de los cuantos ha inspirado interesantes debates sobre los límites de la capacidad humana para medir con exactitud las propiedades de los objetos pequeños. Las discusiones se centran en la idea de que el acto de medir afecta la SCREENCAST: Incertidumbre

cantidad que se va a medir.

cuántica

Por ejemplo, se sabe que, si colocas un termómetro frío en una taza de café caliente, la temperatura del café se altera pues éste cede calor al termómetro. El dispositivo de medición altera la cantidad que se va a medir. Pero estos errores de medición pueden corregirse si conoces la temperatura inicial del termómetro, las masas y calores específicos involucrados, y así sucesivamente. Dichas correcciones entran muy bien dentro del dominio de la física clásica; no son las incertidumbres de la física cuántica. Las incertidumbres cuánticas surgen de la naturaleza ondulatoria de la materia. Una onda, por su propia naturaleza, ocupa un espacio determinado y dura un tiempo definido.

No puede apretujarse en un punto en el espacio o limitarse a un solo instante porque entonces no sería una onda. Esta "imprecisión" inherente de una onda otorga una imprecisión o incertidumbre en la medición a nivel cuántico. Innumerables experimentos han demostrado que cualquier medición que sondee de alguna manera un sistema, necesariamente perturba al sistema por al menos un cuanto de acción, h, la constante de Planck. De modo que cualquier medición que involucre una interacción entre el observador y lo que se mide está sujeta a esta mínima inexactitud.

C A PÍ T U LO 31 CUA N TOS D E LU Z

593

Hay que distinguir entre observar y sondear. Piensa en una taza de café al otro lado de la habitación. Si la observas de un modo pasivo y ves que de ella sale vapor, este acto de “medición” no involucra interacción física entre tus ojos y el café. Tu mirada ni agrega ni quita energía al café. Puedes afirmar que está caliente sin sondearla.

Colocar un termómetro en su interior es otra historia. Interactúas físicamente con el café y, por tanto, lo sometes a una alteración. Sin embargo, la aportación cuántica a esta alteración es eclipsada completamente por las incertidumbres clásicas y es despreciable. Las incertidumbres cuánticas son significativas sólo en los ámbitos atómico y subatómico.

Compara el acto de hacer mediciones de una pelota de béisbol lanzada y de un electrón. Puedes medir la rapidez de una pelota de béisbol lanzada si la haces volar a través de un par de sensores fotoeléctricos de barrera que estén separados una distancia conocida (Figura 31.13). La pelota se cronometra cuando interrumpe los haces de luz de los sensores. La exactitud en la medición de la rapidez de la pelota tiene que ver con incertidumbres en la distancia medida entre los sensores y en los mecanismos de cronometrado. Las interacciones entre la pelota macroscópica y los fotones que encuentra son insignificantes.

F I G U R A 3 1 . 1 3

Fuentes de luz de

Para medir la rapidez de la pelota se

los sensores

divide la distancia que hay entre los

sensores entre la diferencia de tiempo

que tarda en cruzar las dos trayectorias

de luz. Los fotones que golpean la pelota

alteran su movimiento mucho menos

Detectores

de lo que un grupo de moscas alteran el

movimiento de un supertanque petrole-

ro cuando saltan sobre él.

Cronómetro

Pero no es así cuando se trata de medir cosas submicroscópicas,

como los electrones. Incluso un solo fotón que rebote en un electrón altera mucho el movimiento del electrón, y en una forma impredecible. Si quieres observar un electrón y determinar su paradero con luz, la longitud de onda de la luz tendría que ser muy corta. Te enfrentas SCREENCAST: El principio

a un dilema. La luz con una longitud de onda corta, que puede "ver" mejor al pequeño de incertidumbre

electrón, corresponde a un gran cuanto de energía que, a su vez, altera enormemente el estado de movimiento del electrón. Si, por otra parte, usas una longitud de onda grande que corresponde a un cuanto de energía más pequeño, el cambio que induces en el estado de movimiento del electrón será menor, pero la determinación de su posición por medio de la onda más burda será menos exacta. El acto de observar algo tan pequeño como un electrón sondea al electrón y, al hacerlo, produce una incertidumbre considerable en su posición o en su movimiento. Si bien esta incertidumbre es por completo despreciable cuando se mide la posición y el movimiento de los objetos cotidianos (macroscópicos), es un hecho predominante de la vida en el ámbito atómico.

La incertidumbre de las mediciones en el ámbito atómico, que por primera vez fueron establecidas matemáticamente por el físico alemán Werner Heisenberg, se denomina principio de incertidumbre. Es un principio fundamental de la mecánica cuántica. Heisenberg descubrió que, cuando se multiplican las incertidumbres en las mediciones de la cantidad de movimiento y la posición de una partícula, el producto debe ser igual a o mayor que la constante de Planck, h, dividida entre 2, que se representa como h– (llamada h-barra).4 El principio de incertidumbre se enuncia en una fórmula simple:

D p D x $ h–

Werner Heisenberg (1901-1976)

4El físico cuántico Ken Ford homenajea a h– en el número de placa de su Honda Civic híbrido (página 375).

Aquí, D significa "incertidumbre de": D p es la incertidumbre de la cantidad de movimiento (por convención, el símbolo para cantidad de movimiento es p) y D x es la incertidumbre de la posición. El producto de estas dos incertidumbres debe ser igual a o mayor que ($) el tamaño de h–. Para incertidumbres mínimas, el producto será igual a h–; el producto de incertidumbres más grandes será mayor que h–. Pero en ningún caso el producto de las incertidumbres será menor que h–. La importancia del principio de incertidumbre es que, incluso en las mejores condiciones, el límite inferior de incertidumbre es h–. Esto significa que, si quieres conocer la cantidad de movimiento de un

¡Nunca puedes cambiar sólo una

cosa! Toda ecuación te recuer-

electrón con gran exactitud (pequeña D p), la incertidumbre correspondiente en la po-da esto: no puedes cambiar un

sición será grande. O, si quieres conocer la posición con gran exactitud (pequeña D x), término en un lado sin afectar el

la incertidumbre correspondiente en la cantidad de movimiento será grande. Cuanto otro lado.

más precisa sea una de estas cantidades, menos precisa será la otra.5

El principio de incertidumbre funciona de manera similar con la energía y el tiempo. No puedes medir la energía de una partícula con completa precisión en un tiempo infinitesimalmente corto. La incertidumbre en el conocimiento de la energía, D E, y el tiempo que toma medir la energía, D t, se relacionan mediante la expresión6

D E D t $ h–

La mayor exactitud que se puede esperar jamás obtener es cuando el producto de las incertidumbres de energía y tiempo es igual a h–. Cuanto mayor sea la exactitud con que determines la energía de un fotón, un electrón o una partícula de cualquier tipo, mayor será la incertidumbre en cuanto al tiempo durante el cual tiene dicha energía.

El principio de incertidumbre es relevante sólo para fenómenos cuánticos. La falta de exactitud cuando se mide la posición y la cantidad de movimiento de una pelota de béisbol y que se debe a

efectos cuánticos es por completo despreciable. Pero las imprecisiones cuando se mide la posición y la cantidad de movimiento de un electrón están lejos de ser despreciables. Esto se debe a que las incertidumbres en las mediciones de estas cantidades subatómicas son similares a las magnitudes de las cantidades mismas.7

Hay un peligro al aplicar el principio de incertidumbre en áreas fuera de la mecánica cuántica. Algunas personas concluyen por afirmaciones sobre la interacción entre el observador y lo observado que el Universo no existe "ahí afuera", independiente de todos los actos de observación, y que la realidad la crea el observador. Otros interpretan el principio de incertidumbre como el escudo con el que la naturaleza se protege de secretos vedados. Algunos críticos de la ciencia utilizan el principio de incertidumbre como evidencia de que la ciencia en sí es incierta. La realidad del Universo (ya sea observada o no), de los secretos de la naturaleza y de las incertidumbres de la ciencia tienen muy poco que ver con el principio de incertidumbre de Heisenberg. La profundidad del principio de incertidumbre tiene que ver con la interacción inevitable entre la naturaleza al nivel atómico y los medios que tienen los investigadores para sondearla.

5En un mundo hipotético meramente clásico, h– sería cero y las incertidumbres tanto de posición como de cantidad de movimiento podrían ser arbitrariamente pequeñas. En el mundo real, la constante de Planck es mayor que cero y, en principio, no se pueden conocer simultáneamente ambas cantidades con certeza.

6Puedes ver que esto es congruente con la incertidumbre en la cantidad de movimiento y en la posición. Recuerda que D cantidad de movimiento 5 fuerza 3 tiempo y que D energía 5 fuerza 3 D distancia. Entonces: h– 5 D cantidad de movimiento 3 D distancia

5 (fuerza 3 D distancia) 3 D tiempo

5 D energía 3 D tiempo

7Las incertidumbres en las mediciones de la cantidad de movimiento, la posición, la energía o el tiempo que se relacionan con el principio de incertidumbre para una pelota de béisbol lanzada son sólo 1 parte en más o menos 10 mil billones de trillones (10234). Los efectos cuánticos son despreciables incluso en el caso de la bacteria más indolente, donde las incertidumbres son de más o menos 1 parte en mil millones (1029). Los efectos cuánticos se vuelven evidentes en el

caso de los átomos, donde las incertidumbres pueden ser de hasta 100%. En lo que se refiere a los electrones que se mueven en un átomo, las incertidumbres cuánticas dominan, y estás en el ámbito cuántico a gran escala.

C A PÍ T U LO 31 CUA N TOS D E LU Z

595

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿El principio de incertidumbre de Heisenberg es aplicable al caso práctico de usar un termómetro para medir la temperatura de un vaso con agua?

2. Un contador Geiger mide el decaimiento radiactivo al registrar los pulsos eléctricos producidos en un tubo de gas cuando partículas de alta energía pasan a través de él. Las partículas emanan de una fuente radiactiva (por decir, radio). ¿El acto de medir la tasa de decaimiento radiactivo del radio altera al radio o a su tasa de decaimiento?

3. ¿El principio cuántico de que uno no puede observar algo sin cambiarlo puede extrapolarse razonablemente para sustentar la afirmación de

que puedes hacer que un extraño dé la vuelta y te mire, si lo miras atentamente en la espalda?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. No. Si bien es probable que sometas la temperatura del agua a un

cambio por el hecho de sondearla con un termómetro, en especial uno mucho más frío o más caliente que el agua, las incertidumbres que se relacionan con la precisión del termómetro están dentro del dominio de la física clásica. La importancia de las incertidumbres en el nivel subatómico no es aplicable aquí.

2. No en absoluto, porque la interacción involucrada está entre el contador Geiger y las partículas, no entre el contador Geiger y el radio. El comportamiento de las partículas es el que se altera por la medición, no el radio del cual emana. Fíjate cómo se relaciona esto con la siguiente pregunta.

3. No. Aquí debes tener mucho cuidado de definir qué se entiende por observar. Si la observación involucra un sondeo (dar o extraer energía), sí se cambia en cierto grado lo que se observa. Por ejemplo, si alumbras con una fuente luminosa la espalda de la persona, la observación consiste en un sondeo, el cual, por ligero que sea, altera físicamente la configuración de los átomos en su espalda. Si la persona percibe esto, podría voltear. Pero sólo mirar atentamente su espalda es observar en el sentido pasivo. La luz que recibes (o bloqueas con tu parpadeo, por ejemplo) ya abandonó su espalda. De modo que, ya sea que mires fijamente, guiñas o cierres los ojos por completo, en ninguna forma física alteras la configuración atómica de su espalda. Alumbrar con una luz o sondear algo no es lo mismo que mirarlo pasivamente. La imposibilidad de distinguir entre sondear y observar pasivamente está en la raíz de muchos disparates que se dicen y de los que se afirma que están sustentados por la física cuántica. Una mejor manera de apoyar la afirmación anterior sería con resultados positivos obtenidos con una prueba simple y práctica, en vez de afirmar que se basa en la teoría cuántica, que se ha ganado su reputación con tanto esfuerzo.

31.8 Complementariedad

El reino de la física cuántica parece confuso. Las ondas de luz que interfieren y se difractan suministran su energía en paquetes de cuantos: partículas. Los electrones que se mueven por el espacio en líneas rectas y experimentan colisiones como si fuesen partículas se distribuyen espacialmente en patrones de interferencia como si fueran ondas.

En esta confusión, hay un orden subyacente. ¡El comportamiento de la luz y los electrones es confuso en la misma manera! La luz y los electrones muestran ambos características de onda y de partícula.

El físico danés Niels Bohr, uno de los fundadores de la física cuántica, formuló una expresión explícita de la totalidad inherente en este dualismo. Él llamó a su Niels Bohr (1885-1962)

expresión de esta totalidad, complementariedad. Como Bohr lo expresó, los fenómenos cuánticos muestran propiedades de complementariedad (mutuamente excluyente), y aparecen como partículas o como ondas, dependiendo del tipo de experimento realizado. Los experimentos diseñados para examinar intercambios individuales de energía y cantidad de movimiento revelan propiedades de partícula, en tanto que los experimentos concebidos para examinar la distribución espacial de la energía revelan propiedades ondulatorias. Las propiedades ondulatorias y las de partícula de la luz se complementan entre sí: ambas son necesarias para la comprensión de la "luz". Cuál parte se enfatiza, depende de qué pregunta plantee uno a la naturaleza.

La complementariedad no es un compromiso, y no significa que toda la verdad acerca de la luz se encuentre en alguna parte entre las partículas y las ondas. Más bien es como ver los lados de un cristal. Lo que ves depende de qué faceta estés mirando, razón por la cual la luz, la energía y la materia parecen comportarse como cuantos en algunos experimentos y como ondas en otros.

La idea de que los opuestos son componentes de una totalidad no es nueva. Las antiguas culturas orientales la incorporaron como una parte integral de su cosmovisión.

Esto se demuestra en el diagrama yin-yang del T'ai Chi Tu (Figura 31.14). Un lado del círculo se llama yin (negro) y el otro lado se llama yang (blanco). Donde hay yin, hay yang. Sólo la unión de yin y yang forma un todo. Donde hay bajo, también hay alto. Donde hay noche, también hay día. Donde hay nacimiento, también hay muerte. Una persona completa integra yin (rasgos femeninos, cerebro derecho, emoción, intuición, oscuridad, frío, humedad) con yang (rasgos masculinos, cerebro izquierdo, razón, lógica, luz, calor, sequedad). Cada una tiene aspectos del otro. Para Niels Bohr, el diagrama yin-yang simbolizaba el principio de complementariedad. Al final de su F I G U R A 3 1 . 1 4

vida, Bohr escribió ampliamente sobre las repercusiones de la complementariedad. En Los opuestos se ven como complementos

mutuos en el símbolo del yin-yang de las 1947, cuando fue nombrado caballero por sus aportaciones a la física, eligió para su culturas orientales.

escudo de armas el símbolo del yin-yang.

PREDICTIBILIDAD Y CAOS

Puedes hacer predicciones de un sistema ordenado cuando

conoces las condiciones iniciales. Por ejemplo, puedes

establecer con precisión dónde aterrizará un cohete lanzado,

dónde estará un planeta dado en un momento particular, o cuándo

ocurrirá un eclipse. Éstos son ejemplos de acontecimientos en el

macromundo newtoniano. De un modo similar, en el micromundo

cuántico, puedes predecir dónde es probable que esté un electrón en un átomo y la probabilidad de que una partícula radiactiva decaiga en un intervalo dado. La predictibilidad en los sistemas ordenados,

tanto newtonianos como cuánticos, depende del conocimiento de

las condiciones iniciales.

Sin embargo, algunos sistemas, ya sean newtonianos o cuánticos,

no son ordenados: son inherentemente impredecibles. A éstos se

les denomina "sistemas caóticos". El flujo de agua turbulento es un ejemplo. Sin importar con cuánta precisión se conozcan las condiciones iniciales de un pedazo de madera que flota al tiempo preguntar: "¿El aleteo de una mariposa en Brasil provoca un tornado que fluye corriente abajo, no puedes predecir su ubicación más tarde en Texas?" Ahora se habla del efecto mariposa cuando uno lidia con corriente abajo. Una característica de los sistemas caóticos es que una situaciones en las que efectos muy pequeños pueden amplificarse y pequeña diferencia en las condiciones iniciales ocasiona resultados convertirse en efectos muy grandes. posteriores muy diferentes. Dos pedazos idénticos de madera apenas Es interesante que el caos no sea todo impredecibilidad separados un poco en un momento pueden estar muy separados desesperanzada. Aun en un sistema caótico puede haber patrones de poco tiempo después. regularidad. Existe orden en el caos. Los científicos han aprendido El clima es caótico. Pequeños cambios en el clima de un día cómo tratar el caos matemáticamente y cómo encontrar las partes de pueden producir grandes (y enormemente impredecibles) cambios él que son ordenadas. Los artistas buscan patrones en la naturaleza una semana después. Los meteorólogos hacen su mejor esfuerzo, pero de un modo distinto. Tanto científicos como artistas buscan se enfrentan al hecho concreto del caos en la naturaleza. Esta barrera conexiones en la naturaleza que siempre han estado ahí pero que para la predicción exacta condujo al meteorólogo Edward Lorenz a

todavía no se unen en el pensamiento humano.

C A PÍ T U LO 31 R E V ISI Ó N

597

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)
Cuanto. Del latín quantus, que significa "cuanto". Un cuanto Efecto fotoeléctrico. La emisión de electrones de una superfi-es una unidad elemental de una cantidad, una cantidad

cie metálica cuando la luz alumbra sobre el a.

discreta de algo. Un cuanto de energía electromagnética se

Principio de incertidumbre. El principio, formulado por

l ama fotón.

Werner Heisenberg, que afirma que la constante de Planck,

Física cuántica. La física que describe el micromundo, donde h, establece un límite sobre la exactitud de una medición.

muchas cantidades son granulares (en unidades llamadas

De acuerdo con el principio de incertidumbre, no es posible

cuantos), no continuas, y donde las partículas de luz (fotones) medir de manera exacta tanto la posición como la cantidad de

y las partículas de materia (como los electrones) muestran

movimiento de una partícula al mismo tiempo, ni la energía y

propiedades tanto de onda como de partícula.

el tiempo durante el cual la partícula tiene dicha energía.

Constante de Planck. Una constante fundamental, h, que Complementariedad. El principio, enunciado por Niels Bohr,

relaciona la energía de los cuantos de luz con su frecuencia:

que afirma que los aspectos de onda y de partícula tanto

de la materia como de la radiación son partes necesarias y

h 6.6 1034 J s

complementarias del todo. Cuál parte se enfatiza depende

de qué experimento se realiza (es decir, de qué pregunte uno

a la naturaleza).

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N) 31.1 El nacimiento de la teoría cuántica

12. ¿La luz interactúa con un detector en forma de onda o de

1. ¿Cuál teoría de la luz, la teoría ondulatoria o la teoría

partícula?

corpuscular, apoyaron los hallazgos de Young, Maxwell y

13. ¿Cuándo se comporta la luz como onda? ¿En qué

Hertz?

momento se comporta como partícula?

2. ¿El efecto fotoeléctrico respalda la teoría ondulatoria o la

31.6 Partículas como ondas: difracción

teoría corpuscular de la luz?

de electrones

3. ¿Exactamente qué consideró Max Planck que estaba cuan-

tizado: la energía de los átomos en vibración o la energía de

14. ¿Qué evidencia puedes citar de la naturaleza ondulatoria

la luz en sí?

de las partículas?

15. Cuando los electrones se difractan por una doble rendi-

31.2 Cuantización y la constante de Planck

ja, ¿golpean la pantalla en forma de onda o en forma de

4. ¿Cómo se le llama a un cuanto de luz?

partícula? ¿El patrón de golpes es como el de una onda o

5. En la fórmula E 5 hf, ¿la f representa la frecuencia de la como el de una partícula?

onda, tal como se definió en el Capítulo 19?

31.7 Principio de incertidumbre

6. ¿Cuál tiene los cuantos con energía más baja: la luz roja o

16. ¿En cuál de los siguientes las incertidumbres cuánticas

la luz azul? ¿Las ondas de radio o los rayos X?

son significativas: medir simultáneamente la rapidez y

31.3 Efecto fotoeléctrico

la posición de una pelota de béisbol; de una pelotita de

papel mascado; de un electrón?

7. ¿Cuáles logran desalojar mejor electrones de una superfi-

cie metálica: los fotones de luz violeta o los fotones de luz

17. ¿Cuál es el principio de incertidumbre con respecto a la

roja? ¿Por qué?

cantidad de movimiento y a la posición?

8. ¿Por qué un haz muy brillante de luz roja no impartirá

18. Si las mediciones muestran una posición precisa para un

más energía a un electrón expulsado que un haz tenue de

electrón, ¿dichas mediciones pueden mostrar también

luz violeta?

una cantidad de movimiento preciso?

19. Si una medición muestra un valor preciso para la energía

31.4 Dualidad onda-partícula

radiada por un electrón, ¿dicha medición también mues-

9. ¿Por qué las fotografías de un libro o revista se ven granu-

tra un tiempo preciso para este evento?

losas cuando se amplifican?

20. ¿Cuál es la diferencia, en este libro, entre observar un

10. ¿La luz se comporta principalmente como onda o como

evento de manera pasiva y activa?

partícula cuando interactúa con los cristales de materia

en las películas fotográficas?

31.8 Complementariedad

21. ¿Qué es el principio de complementariedad?

31.5 Experimento de la doble rendija

22. Cita una evidencia de que la idea de los opuestos como

11. ¿La luz viaja de un lugar a otro en forma de onda o de

componentes de una totalidad precedió al principio

partícula?

de complementariedad de Bohr.

598

PA R T E SEI S

LU Z

P I E N S A Y R E S U E L V E (A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 23. Una longitud de onda típica de radiación infrarroja

25. Decides poner a rodar una bola de 0.1 kg por el suelo

emitida por tu cuerpo es de 25 mm (2.5 3 1022 m).

tan lentamente que tendrá una pequeña cantidad de

Demuestra que la energía por fotón de tal radiación es de

movimiento y una gran longitud de onda de De Broglie.

aproximadamente 8.0 3 10224 J.

Si la ruedas a 0.001 m/s, ¿cuál es su longitud de onda?

24. Considera la longitud de onda de De Broglie de un

¿Cómo se compara esto con la longitud de onda de De

electrón que golpea la cara posterior de uno de los

Broglie del electrón de alta rapidez del problema anterior?

primeros modelos de pantalla de televisión a 1/10 la

rapidez de la luz. Demuestra que la longitud de onda del

electrón es 2.4 3 10211 m.

P I E N S A Y E X P L I C A (S Í N T E S I S)

26. ¿Qué se entiende cuando se dice que algo está cuantizado?

42. ¿La explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico inva-

27. Distingue entre la física clásica y la física cuántica.

lida la explicación de Young del experimento de la doble

28. En el Capítulo 30 aprendiste la fórmula E ~ f. En este rendija? Explica.

capítulo aprendiste la fórmula E 5 hf. Explica la diferen-43. La cámara que tomó la fotografía del rostro de la mujer

cia entre estas dos fórmulas. ¿Qué es h?

(Figura 31.5) tenía lentes ordinarios que se sabe bien

29. La frecuencia de la luz violeta es cerca del doble de la

que refractan ondas. Sin embargo, la formación paso a

de la luz roja. ¿Cómo se compara la energía de un fotón

paso de la imagen es evidencia de la presencia de fotones.

violeta con la energía de un fotón rojo?

¿Cómo puede ser esto? ¿Cuál es tu explicación?

30. ¿Cuál tiene más energía: un fotón de luz visible o un

44. ¿Qué evidencia puedes citar de la naturaleza ondulatoria

fotón de luz ultravioleta?

de la luz? ¿De la naturaleza corpuscular de la luz?

31. Se habla de fotones de luz roja y fotones de luz verde.

45. ¿En qué momento un fotón se comporta como onda? ¿En

¿Puedes hablar de fotones de luz blanca? ¿Por qué sí o por

qué momento se comporta como partícula?

qué no?

46. Se ha argumentado que la luz es una onda y luego

32. ¿Cuál haz láser porta más energía por fotón: un haz rojo

una partícula, y así sucesivamente. ¿Esto indica que la

o un haz verde?

verdadera naturaleza de la luz probablemente se encuen-

tre en alguna parte entre estos dos modelos?

33. Si un haz de luz roja y un haz de luz azul tienen exacta-

mente la misma energía, ¿cuál haz contiene mayor núme-

47. ¿Qué aparato de laboratorio aprovecha la naturaleza

ro de fotones?

ondulatoria de los electrones?

48. ¿Cómo es que un átomo puede obtener suficiente energía

34. En el efecto fotoeléctrico, ¿la intensidad o la frecuencia

para ionizarse?

determina la energía cinética de los electrones expulsados?

¿Cuál determina el número de electrones expulsados?

49. Un fotón de rayos X puede golpear un electrón sin

que el electrón recoja toda la energía del fotón. Plan-

35. Una fuente muy brillante de luz roja tiene mucha más

tea una hipótesis acerca de la frecuencia del fotón que

energía que una fuente tenue de luz azul, pero la luz roja

"abandona la escena" de la colisión. (Este fenómeno se

no tiene capacidad para expulsar electrones de una deter-

conoce como efecto Compton.)

minada superficie fotosensible. ¿Por qué esto es así?

50. Un átomo de hidrógeno y un átomo de uranio se mueven

36. ¿Por qué los fotones ultravioleta son más efectivos para

con la misma rapidez. ¿Cuál posee más cantidad de movi-

inducir el efecto fotoeléctrico que los fotones de luz visible?

miento? ¿Cuál tiene una longitud de onda más larga?

37. ¿Por qué la luz que golpea una superficie metálica expulsa

51. Si una bala de cañón y el proyectil de una carabina de

sólo electrones y no protones?

aire comprimido tienen la misma rapidez, ¿cuál tiene la

38. ¿El efecto fotoeléctrico depende principalmente de la natu-

longitud de onda más larga?

raleza ondulatoria o de la naturaleza corpuscular de la luz?

52. ¿Cuál es la principal ventaja que tiene un microscopio

39. Explica cómo se usa el efecto fotoeléctrico para abrir

electrónico sobre un microscopio óptico?

puertas automáticas cuando alguien se aproxima.

53. ¿Un haz de protones en un "microscopio protónico" mos-

40. Explica en forma breve cómo se usa el efecto fotoeléctrico

traría mayor o menor difracción que los electrones con la

en el funcionamiento de al menos dos de los siguientes:

misma rapidez en un microscopio electrónico? Defiende

un ojo eléctrico, el exposímetro de un fotógrafo, la pista

tu respuesta.

sonora de una película predigital.

54. Imagina que la naturaleza fuera por completo diferente

41. Si alumbras con luz ultravioleta la bola metálica de un

y que se necesitara un número infinito de fotones para

electroscopio con carga negativa (que se muestra en las

constituir incluso la más pequeña cantidad de energía

preguntas 56 y 57 del Capítulo 22), se descargará. Pero

radiante, que la longitud de onda de las partículas mate-

si el electroscopio tiene carga positiva, no se descargará.

riales fuera cero, que la luz no tuviera propiedades de

¿Puedes atreverte a dar una explicación?

partícula y la materia no tuviera propiedades de onda.

C A PÍ T U LO 31 R E V ISI Ó N

599

Éste sería el mundo clásico descrito por la mecánica de

predecirse con exactitud? (¿Hay alguna diferencia entre

Newton y la electricidad y el magnetismo de Maxwell.

las propiedades que son mensurables y las propiedades que

¿Cuál sería el valor de la constante de Planck para tal

son predecibles?)

mundo sin efectos cuánticos?

59. Cuando verificas la presión de los neumáticos, algo de

55. Considera uno de los muchos electrones que hay sobre la

aire escapa. ¿Por qué el principio de incertidumbre no

punta de tu nariz. Si alguien la mira, ¿su movimiento se

se aplica aquí?

alteraría? ¿Y si la ve con un ojo cerrado? ¿Con los dos ojos

60. Si una mariposa causa un tornado, ¿tiene sentido erradi-

abiertos, pero cruzados? ¿Aquí se aplica el principio de

car a las mariposas? Defiende tu respuesta.

incertidumbre de Heisenberg?

61. ¿Has escuchado la expresión "dar un salto cuántico" para

56. ¿El principio de incertidumbre te dice que nunca puedes

describir grandes cambios? ¿La expresión es adecuada?

conocer algo con certeza?

Defiende tu respuesta.

57. ¿Alteras inadvertidamente las realidades que intentas medir en una encuesta de opinión pública? ¿Aquí se aplica el principio de incertidumbre de Heisenberg?

58. Si el comportamiento de un sistema se midió con exactitud durante determinado periodo y se entendió, entonces, ¿el comportamiento futuro de dicho sistema puede medirse o un ejemplo de mala conducta académica?

P I E N S A Y D I S C U T E (E V A L U A C I Ó N)

63. Una de las dificultades técnicas que enfrentaron los que crearon la televisión a color fue el diseño de un tubo de imagen (cámara) para la porción roja de la imagen. En términos de energía, discute por qué encontrar un material que respondiera a la luz roja era más difícil que encontrar uno que respondiera a la luz verde.

69. Un electrón y un protón viajan con la misma rapidez. ¿Cuál tiene mayor cantidad de movimiento? ¿Cuál tiene la longitud de onda más larga?

62. Para medir la edad exacta del viejo Matusalén, el árbol vivo más antiguo del mundo, un profesor de dendrología en Nevada, auxiliado por un empleado de la U.S. Bureau of Land Management, derribó el árbol en 1965 y contó sus anillos. ¿Este es un ejemplo extremo de alterar lo que ces, ¿el comportamiento futuro de dicho sistema puede mides o un ejemplo de mala conducta académica?

63. Una de las dificultades técnicas que enfrentaron los que crearon la televisión a color fue el diseño de un tubo de imagen (cámara) para la porción roja de la imagen. En términos de energía, discute por qué encontrar un material que respondiera a la luz roja era más difícil que encontrar uno que respondiera a la luz verde.

69. Un electrón y un protón viajan con la misma rapidez. ¿Cuál tiene mayor cantidad de movimiento? ¿Cuál tiene la longitud de onda más larga?

trar materiales que respondieran a las luces verde y azul.

70. Un electrón viaja el doble de rápido que otro. ¿Cuál tiene

64. Los fósforos dentro de las lámparas fluorescentes convier-

la longitud de onda más larga?

ten la luz ultravioleta en luz visible. Discute la ausencia de

71. Analiza si la longitud de onda de De Broglie de un pro-

sustancias que convierten la luz visible en luz ultravioleta.

tón se alarga o se acorta con la velocidad.

65. El bromuro de plata (AgBr) es una sustancia sensible a

72. No percibes la longitud de onda de la materia en movi-

la luz utilizada en algunos tipos de película fotográfica.

miento en tu experiencia cotidiana. ¿Esto se debe a que la

Para producir la exposición de la película, ésta debe ilu-

longitud de onda es extraordinariamente grande o extre-

minarse con luz que tenga suficiente energía como para

madamente pequeña?

separar las moléculas. Discute la razón por la cual esta

73. Imagina que vives en un mundo hipotético en el cual eres

película podría manejarse sin exponerse en una habita-

derribado por un solo fotón, en el que la materia es tan

ción oscura iluminada con luz roja. ¿Y qué hay de una luz

ondulatoria que es borrosa y difícil de asir, y en el que el

azul? ¿Y de luz roja muy brillante en relación con luz azul

principio de incertidumbre afecta mediciones simples de

muy tenue?

la posición y la rapidez en un laboratorio, por lo que los

66. Las quemaduras solares producen daño celular en la piel.

resultados son irreproducibles. En un mundo así, analiza

¿Por qué la radiación ultravioleta puede producir este

cómo se compara la constante de Planck con el valor

daño, en tanto que la radiación visible, que es incluso más

aceptado.

intensa, no lo produce?

74. Discute la idea de que la teoría que uno acepta deter-

67. Discute cómo la lectura del medidor de la Figura 31.1

mina el significado de las observaciones propias y no al

variará a medida que la placa fotosensible se ilumine con

contrario.

luz de varios colores con una intensidad determinada y

75. Un amigo dice: "si un electrón no es una partícula,

con luz de varias intensidades de un color determinado.

entonces debe ser una onda". ¿Cuál es tu respuesta?

68. ¿El efecto fotoeléctrico demuestra que la luz está hecha de
(¿Escuchas con frecuencia este tipo de enunciados "Si…

partículas? ¿Los experimentos de interferencia demuestran

entonces"?)

P A R T E S E I S Examen de práctica de opción múltiple

Elige la MEJOR respuesta a cada una de las siguientes:

16. Cuando un buzo apunta una linterna hacia arriba, hacia la super-

ficie del agua, en un ángulo de 20 desde la normal, el haz de luz

1. ¿Cuál de éstas NO pertenece a la familia de las ondas

(a) se refleja totalmente de manera interna.

electromagnéticas?

(b) pasa hacia el aire de arriba.

(a) Luz

(c) Ondas de radio

(c) se absorbe.

(b) Sonido

(d) Rayos X

(d) Ninguno de los anteriores.

2. La luz que no transmiten los materiales opacos

17. Una imagen real puede proyectarse sobre una pantalla mediante

(a) se refleja o convierte en energía interna en el material.

(a) una lente convergente. (c) Cualquiera de las anteriores.

(b) principalmente se refleja.

(b) una lente divergente.

(d) Ninguna de las anteriores.

(c) principalmente se refracta.

18. El principio de Huygens para la luz se describe principalmente por (d) se transmite con una frecuencia más baja.

(a) ondas.

(c) partículas.

3. Cuando la sombra de la Luna cae sobre la Tierra, se tiene un

(b) rayos.

(d) fotones.

(a) eclipse lunar.

19. Una rejilla de difracción se apoya en

(b) eclipse solar.

(a) la interferencia de luz.

(c) eclipse solar si es de día y eclipse lunar si es de noche.

(b) las amplitudes de la luz.

(d) evento muy peligroso.

(c) las variaciones en la intensidad de la luz.

4. Negro es la combinación de

(d) la luz compuesta de fotones.

(a) todos los colores.

20. Cuando la luz experimenta interferencia, a veces puede

(b) dos o más colores adecuados.

(a) acumularse hasta más que la suma de las amplitudes.

(c) luz cuando un prisma se sostiene de cabeza.

(b) cancelarse por completo.

(d) Ninguno de los anteriores.

(c) Las dos anteriores.

5. Decir que el pétalo de una rosa es rojo es decir que

(d) Ninguna de las anteriores.

(a) absorbe el rojo.

(c) emite el rojo.

21. Los colores de una pompa de jabón resultan de

(b) refleja el rojo.

(d) transmite el rojo.

(a) la luz convertida a una frecuencia diferente.

6. El color de la luz más intenso en la curva de radiación solar es

(b) la deflexión de la luz.

(a) infrarrojo.

(c) amarillo-verde.

(c) la interferencia de la luz.

(b) rojo.

(d) violeta.

(d) la polarización de la luz.

7. Cuando las luces roja y azul se traslapan, el color producido es

22. La polarización es una propiedad de

(a) magenta.

(c) cian.

(a) las ondas transversales.

(c) todas las ondas.

(b) amarillo.

(d) blanco.

(b) las ondas longitudinales.

(d) Ninguna de las anteriores.

8. El color complementario del azul es

23. Un holograma ilustra mejor la

(a) magenta.

(c) cian.

(a) polarización.

(c) superposición.

(b) amarillo.

(d) blanco.

(b) difracción.

(d) interferencia de electrones.

9. Lo azul del cielo diurno se debe principalmente a la

de la luz.

24. En la proporción E ~ f, la f representa la (a) frecuencia de la luz.

(a) absorción.

(c) reflexión.

(b) frecuencia del sonido.

(b) transmisión.

(d) dispersión.

(c) frecuencia de un diapasón o cuerda vibratoria.

10. Lo rojizo de un atardecer o amanecer se debe principalmente a

(d) fuerza de fricción.

luz que no se ha

25. La energía de un fotón emitido se relaciona con su

(a) absorbido.

(c) dispersado.

(a) amplitud.

(c) cantidad de movimiento.

(b) transmitido.

(d) polarizado.

(b) polarización.

(d) frecuencia.

11. El color verdoso-azul del océano se debe principalmente a luz

26. Entre estos colores, el que tiene más energía por fotón es

que no se ha

(a) el rojo.

(c) el azul.

(a) absorbido.

(c) dispersado.

(b) el amarillo-verde.

(d) el violeta.

(b) reflejado.

(d) refractado.

27. El brillo rojo del tubo de neón de un anuncio publicitario es

12. La distancia de tu imagen detrás de un espejo plano es igual a

resultado de

(a) la mitad de tu estatura.

(a) fluorescencia.

(c) desexcitación.

(b) la mitad de tu distancia respecto del espejo.

(b) incandescencia.

(d) polarización.

(c) tu distancia enfrente del espejo.

28. Todas las partes de un haz láser tienen la misma

(d) más que tu distancia enfrente del espejo.

(a) frecuencia.

(c) rapidez.

13. La refracción ocurre cuando una onda cruza una frontera y

(b) fase.

(d) Todas las anteriores.

cambia de

29. El modelo de luz más apoyado por el efecto fotoeléctrico es

(a) rapidez y dirección.

(c) frecuencia.

(a) el modelo ondulatorio. (c) Los dos anteriores.

(b) intensidad.

(d) amplitud.

(b) el modelo corpuscular. (d) Ninguno de los anteriores.

14. Cuando la luz blanca pasa a través de un prisma, la luz que se

30. Para encontrar la constante de Planck se divide la energía de un

dobla más que el verde es

fotón entre su

(a) roja.

(c) azul.

(a) longitud de onda.

(c) amplitud.

(b) amarilla.

(d) Ninguno de los anteriores.

(b) frecuencia.

(d) Ninguna de las anteriores.

15. Un arcoíris es el resultado de la luz en las gotas de agua que experimenta

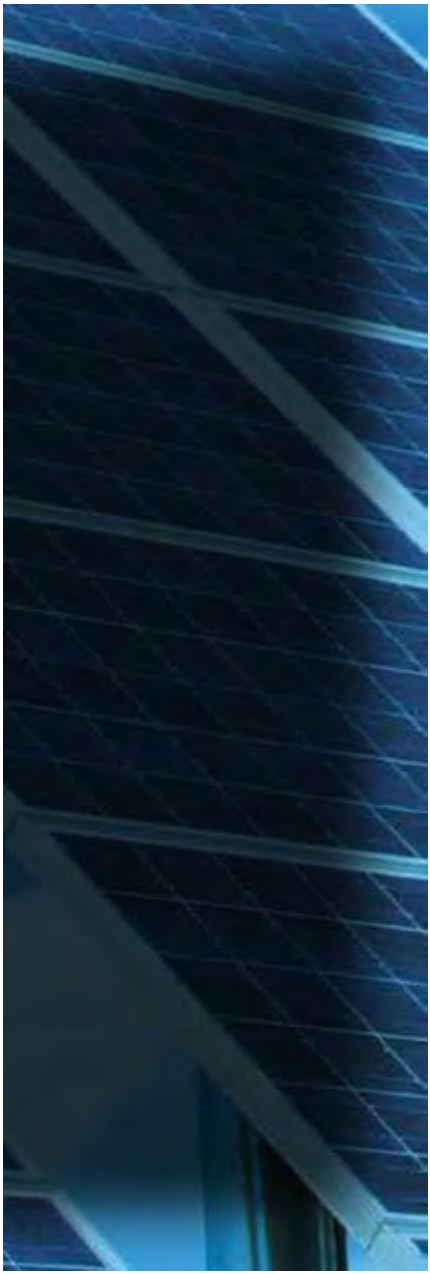
(a) reflexión interna.

(c) refracción.

Después de hacer elecciones razonadas y discutirlas con tus amigos,
(b) dispersión.

(d) Todos los anteriores.

encuentra las respuestas en la página S-1.



P A R T E S I E T E

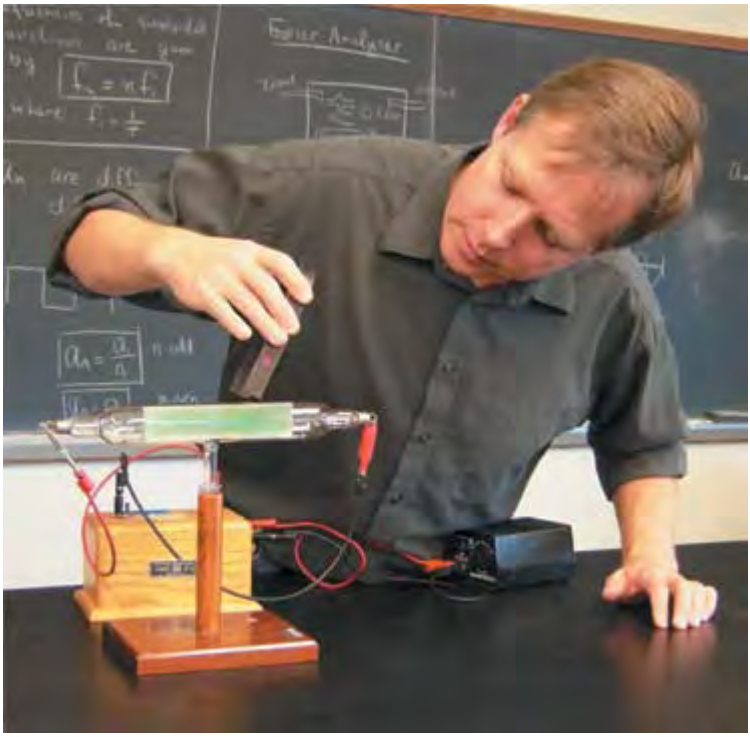
Físicas atómica

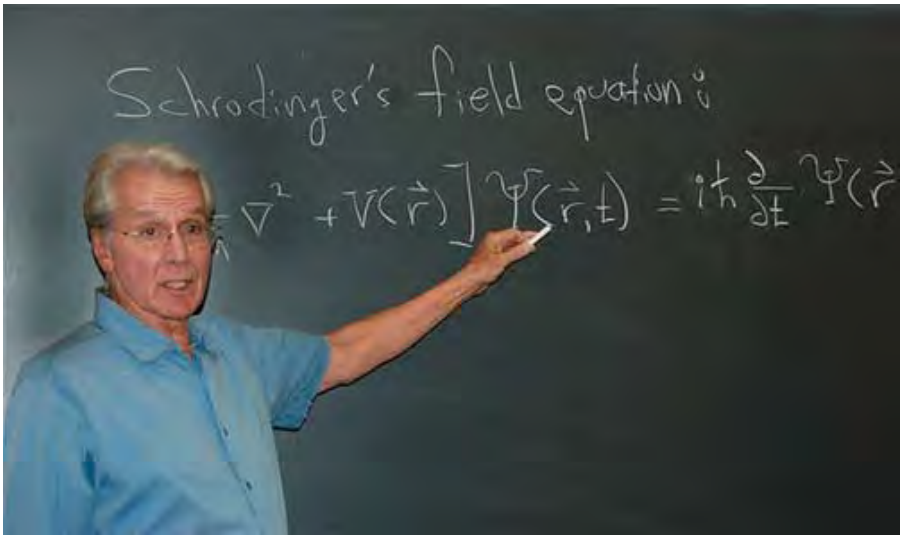
y nuclear

¿Cuál es la fuente de energía que impulsa a este géiser?

Es la misma fuente que calienta los manantiales

termales, alimenta los volcanes y mantiene fundido el interior de la Tierra: ¡procesos radiactivos en las entrañas de la Tierra que son tan viejos como el mismo planeta Tierra!


Fourier-Analyser



32 1

C A P Í T U L O 3 2

El átomo

y el cuanto 2

32.1 Descubrimiento del núcleo atómico

32.2 Descubrimiento del electrón

32.3 Espectros atómicos: pistas para la estructura

atómica

3

32.4 Modelo de Bohr del átomo

32.5 Explicación de los niveles de energía

cuantizados: ondas de electrones

32.6 Mecánica cuántica

32.7 Principio de correspondencia

4

Estos cuatro físicos, que sobresalen en su enseñanza, aterrizan la

física cuántica para sus estudiantes.

1 David Kagan usa una tira de papel corrugado en clase para modelar un electrón en órbita. Los bloques de madera apilados modelan los niveles de energía de los electrones. 2 Roger King usa un imán para doblar un haz de electrones en un tubo de Crookes. 3 Dean Zollman investiga las propiedades nucleares con una versión moderna del experimento de dispersión de Rutherford. 4 El profesor y autor Art Hobson enseña una de sus especialidades: la física cuántica.

C A PÍ T U LO 32 EL ÁTO M O Y EL CUA N TO

603

Albert Einstein ganara el Premio Nobel por su trabajo acerca

del efecto fotoeléctrico. Después de que la teoría cuántica evo-

Niels Bohr nació en Copenhague, Dinamarca, en

1885. Su padre, luterano, era profesor de fisiolo-

gía en la Universidad de Copenhague. Su madre

lucionó y maduró a mediados de la década de 1920, Einstein

provenía de una acaudalada

tuvo grandes reservas respecto de su naturaleza probabilística,

familia judía prominente pues prefería el determinismo de la física clásica. Él y Bohr en la banca y los círculos debatieron estas dos visiones de la física a lo largo de sus vidas, parlamentarios daneses. Su

siempre manteniendo el mayor respeto uno por el otro.

hermano, Harald Bohr, fue

Puesto que la madre de Bohr era judía, él estaba en peligro

matemático y jugador olím-

en la Dinamarca ocupada por los nazis durante la Segunda

pico de soccer en el equipo

Guerra Mundial. En 1943, poco antes de un arresto inmi-

nacional danés. A Niels nente, escapó a Suecia con su familia. Los aliados, al recono-también le apasionaba el cer la importancia de Bohr, lo llevaron de Suecia a Londres soccer, y los dos hermanos en el compartimiento de bombas de un bombardero Mos-jugaron en varios partidos quito desarmado. Bohr olvidó ponerse su máscara de oxíge-nacionales en Copenhague.

no y se desmayó. Por fortuna, el piloto, al percatarse de que

Bohr obtuvo su docto-

algo andaba mal cuando Bohr no respondía los mensajes

Niels Bohr

rado en física en Dinamar-

del intercomunicador, descendió a menor altitud y entregó

ca en 1911. Luego trabajó en Londres a un pasajero todavía vivo. Al parecer Bohr dijo durante un tiempo en el laboratorio de J. J. Thomson, el que había dormido como un bebé durante el vuelo. Después descubridor del electrón, en Trinity Col ege, en Cambridge,

fue a Estados Unidos a trabajar en el Proyecto Manhattan

Inglaterra, antes de continuar su investigación bajo la direc-

estadounidense en el laboratorio ultrasecreto de Los Álamos,

ción de Ernest Rutherford en la University of Manchester,

en Nuevo México. Por razones de seguridad se le asignó el

también en Inglaterra. Rutherford recién había descubierto

nombre de Nicholas Baker durante el proyecto.

que un pequeño núcleo con carga positiva se asienta en el

Después de la guerra, Bohr regresó a Copenhague,

centro de todo átomo, rodeado, presumiblemente, por los donde promovió el uso pacífico de la energía nuclear y la electrones de Thomson. Bohr reflexionó sobre este nuevo posibilidad de compartir información nuclear. Cuando el cuadro del átomo y le agregó principios cuánticos. Publicó

gobierno danés le otorgó la Orden del Elefante, diseñó su

su modelo de la estructura atómica en 1913, en el que los

propio escudo de armas, en el que figuraba un símbolo de

electrones viajan sólo en ciertas órbitas alrededor del núcleo

yin y yang con la leyenda latina contraria sunt complemen-

atómico, y el átomo emite luz cuando los electrones realizan

ta: "los opuestos se complementan".

"saltos cuánticos" de una órbita a otra. Su teoría explicaba de

El hijo de Bohr, Aage, llegó a convertirse en un físico

un modo bril ante las líneas espectrales observadas del hidró-

muy exitoso y, al igual que su padre, ganó el Premio Nobel

geno y las llamadas series de Balmer, así como otras series.

de Física, el suyo en 1975. Niels Bohr murió en Copenha-

Bohr ganó el Premio Nobel de Física en 1922 por su traba-

gue en 1962. Gran parte de este capítulo está inspirado en

jo en la teoría cuántica de los átomos, un año después de que

su visión de la física subyacente de la naturaleza.

32.1 Descubrimiento del núcleo atómico

Media docena de años después de que Einstein anunciara el efecto fotoeléctrico, el físico británico, nacido en Nueva Zelanda, Ernest

Rutherford, dirigía su ahora famoso experimento de la hoja de oro.1 Este significativo experimento demostró que el átomo es, principalmente, espacio vacío, con la mayor parte de su masa concentrada en la región central: el núcleo atómico.

En el experimento de Rutherford, un haz de partículas con carga positiva (partículas alfa) provenientes de una fuente radiactiva, se dirigía a través de una lámina extremadamente delgada de oro. Puesto que las partículas alfa son miles de veces más masivas que los electrones, se esperaba que el chorro de partículas alfa no tuviera impedimento para atravesar un mar de electrones. De hecho esto fue lo que se observó, 1¿Por qué "dirigía"? Para indicar que más investigadores, además de Rutherford, participaron en este experi-
Ernest Rutherford (1871-1937)

mento. La práctica generalizada de elevar a un solo científico a la posición de investigador solitario, lo que pocas veces es el caso, con mucha frecuencia desconoce la intervención de otros investigadores. Ahí está la esencia del dicho: "Hay dos cosas más importantes para las personas que el sexo y el dinero: el reconocimiento y el aprecio".

en su mayor parte. Casi todas las partículas alfa atravesaron la lámina de oro con poca o ninguna desviación y produjeron una mancha de luz cuando golpearon una pantalla fluorescente detrás de la lámina. Pero algunas partículas se desviaron de sus trayecto-
Tiempo después, Rutherford relató

rias en línea recta cuando salieron. Algunas partículas alfa se desviaron ampliamente, que descubrir que las partículas

¡y un pequeño número incluso se dispersó hacia atrás! Estas partículas alfa debieron alfa rebotaban fue el aconteci-golpear algo relativamente masivo, ¿pero qué? Rutherford razonó que las partícu-miento más increíble de su vida,

tan increíble como si la ojiva de un

las que no se desviaron atravesaron espacio vacío en regiones de la lámina de oro, en cañón de 15 pulgadas disparado

tanto que el pequeño número de partículas desviadas fueron repelidas de regiones contra un pedazo de papel tisú

centrales extremadamente densas y con carga positiva. Cada átomo, concluyó, debe rebotara.

contener uno de estos centros, que él llamó núcleo atómico.

Radio en el hueco

F I G U R A 3 2 . 1

de un bloque de

La dispersión ocasional a gran ángulo

plomo

Lámina de oro

de las partículas alfa respecto de los

átomos de oro condujo a Rutherford al

(amplificada)

descubrimiento de los núcleos pequeños

y muy masivos en sus centros.

Pantalla de

sulfuro de cinc

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Qué convenció a Rutherford de que la lámina de oro era en su mayor parte espacio vacío?

2. ¿Qué lo convenció de que las partículas de la hoja de oro eran masivas?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

Observarás que gran parte de este

capítulo es una síntesis de capítu-

1. Descubrir que la mayoría de las partículas alfa no se desviaba indicaba que había los ya estudiados: con suerte, es un

mucho espacio vacío.

capítulo de "recapitulación".

2. Descubrir que algunas partículas alfa rebotaban indicaba la presencia de partículas más masivas que las partículas alfa.

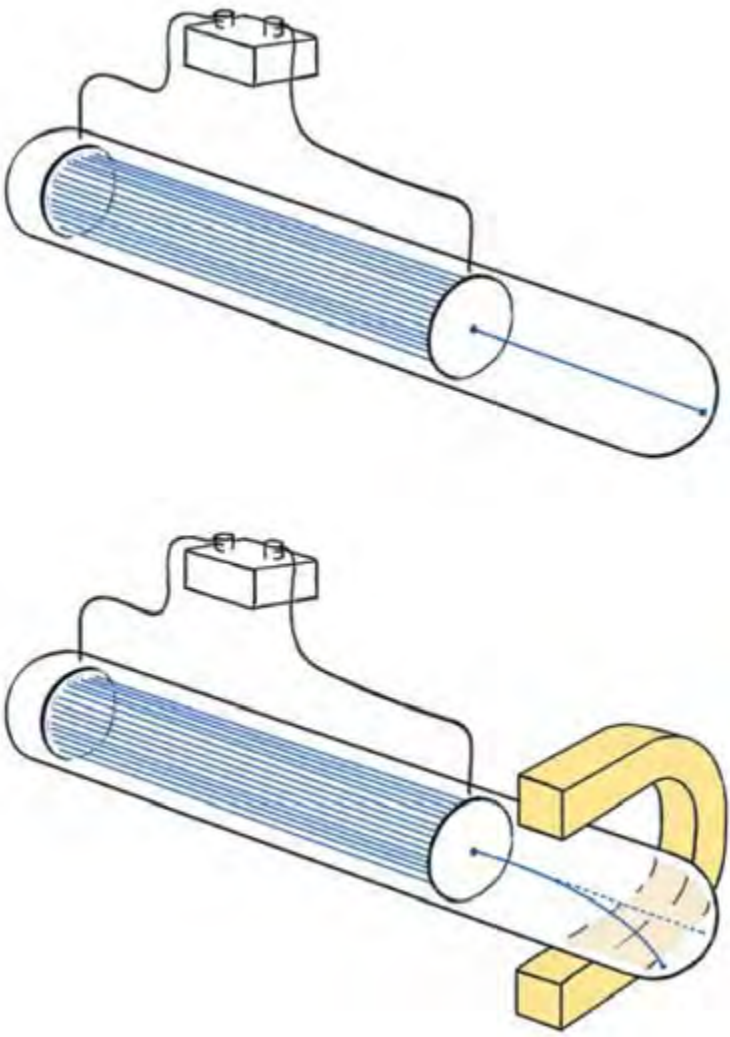
32.2 Descubrimiento del electrón

Alrededor del núcleo atómico hay electrones. El nombre electrón proviene de la palabra griega para ámbar, una resina fósil amarilla parduzca estudiada por los antiguos griegos, quienes descubrieron que, cuando el ámbar se frotaba con un pedazo de tela, atraía cosas como fragmentos de paja. Este fenómeno, conocido como efecto ámbar, siguió siendo un misterio durante casi 2,000 años. A finales del siglo XVI, William Gilbert, médico de la reina Isabel, descubrió otros materiales que se comportaban como el ámbar y los llamó "eléctricos". El concepto de carga eléctrica aguardó los experimentos del científico-estadista estadounidense Benjamín Franklin durante casi dos siglos. Recuerda del Capítulo 22 que Franklin experimentó con electricidad y postuló la existencia de un fluido eléctrico que podía fluir de un lugar a otro. Al objeto con un exceso de este fluido lo denominó eléctricamente positivo, y al que tenía deficiencia del fluido lo denominó eléctricamente negativo. Se creía que el fluido atraía materia ordinaria, pero que se repelía a sí mismo. Aunque ya no se habla de un fluido eléctrico, todavía se sigue el ejemplo de Franklin en lo que se refiere a la manera de definir la electricidad positiva y negativa. El experimento de Franklin de 1752 con la cometa en la tormenta eléctrica demostró que los relámpagos son una descarga eléctrica entre F I G U R A 3 2 . 2

las nubes y el suelo. Este descubrimiento le indicó que la electricidad no se restringe a Experimento del vuelo de una cometa

objetos sólidos o líquidos y que puede atravesar un gas.

de Franklin.



C A PÍ T U LO 32 EL ÁTO M O Y EL CUA N TO

605

Los experimentos de Franklin inspiraron después a otros científicos para producir corrientes eléctricas a través de varios gases diluidos en tubos de vidrio sel ados. Entre el os, en la década de 1870, estuvo

sir Wil iam Crookes, un científico inglés nada ortodoxo que creía que podía comunicarse con los muertos. Es mejor recordado por su "tubo Crookes", un tubo de vidrio sel ado que contiene gas sometido a muy baja presión y tiene electrodos en el interior del tubo en cada extremo (el predecesor de los actuales anuncios de neón). El gas bril aba cuando los electrodos se conectaban a una fuente de voltaje (como una batería).

Diferentes gases bril aban con diferentes colores. Los experimentos realizados con tubos que contienen rendijas y placas metálicas demostraron que el gas se hacía bril ar por algún tipo de "rayo" que salía de la terminal negativa (el cátodo). Las rendijas podían adelgazar el rayo y las placas podían evitar que el rayo llegara a la terminal positiva (el ánodo). Al aparato se le llamó tubo de rayos catódicos, o TRC (en inglés, CRT) (Figura 32.3). Cuando se acercaban al tubo cargas eléctricas, el rayo se desviaba. Se doblaba hacia las cargas positivas y se alejaba de las cargas negativas. El rayo también se desviaba por la presencia de un imán.

Estos hal azgos indicaron que el rayo consistía en partículas con carga negativa.

—

F I G U R A 3 2 . 3

+

(a) Un tubo de rayos catódicos simple. El

Fuente de alto voltaje

pequeño orificio en el ánodo permite

el paso de un estrecho haz que golpea el

extremo del tubo, lo que produce un

punto brillante sobre el vidrio.

Cátodo

(a)

Tubo al vacío

(b) El rayo catódico es desviado por un

(−)

campo magnético.

Rayo catódico

Haz que pasó

(haz)

Ánodo

por el orificio

(+)

del ánodo

−

+

Fuente de alto voltaje

Imán

(b)

Cátodo

(−)

Ánodo

(+)

Ángulo de desviación

Haz

desviado

En el año 1897, el físico inglés Joseph John Thomson (“J. J.”, como lo llamaban sus Desviación

amigos) demostró que los rayos catódicos eran partículas más pequeñas y más ligeras magnética

que los átomos. Creó haces estrechos de rayos catódicos y midió su desviación en campos eléctricos y magnéticos. Thomson pensó que la cantidad de desviación de los haces dependía de la masas de las partículas y de su carga eléctrica. ¿De qué manera? Cuanto mayor sea la masa de cada partícula, mayor será la inercia y menor la desviación.

Cuanto mayor sea la carga de cada una de las partículas, mayor será la fuerza y mayor la des viación. Cuanto mayor sea la rapidez, menor será la desviación.

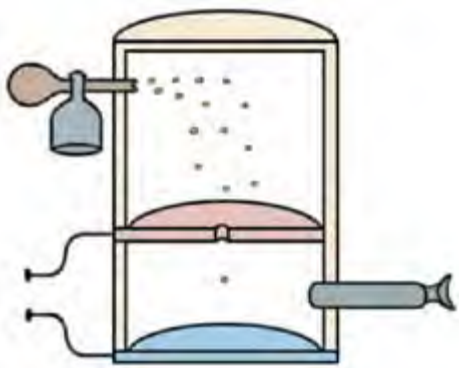
Con mediciones cuidadosas de la desviación del haz, Thomson logró calcular la F I G U R A 3 2 . 4

razón entre masa y carga de la partícula del rayo catódico, a la que llamó electrón. Los TRC como éste eran comunes antes de que las pantallas planas de televisión

Todos los electrones son idénticos; son copias unos de otros. Por establecer la existencia los reemplazaran.

del electrón, J. J. Thomson obtuvo el Premio Nobel de Física en 1906.

En 1909, una docena de años después de que Thomson hizo sus mediciones de la relación entre masa y carga, el físico estadounidense Robert Millikan realizó un experimento que le permitió calcular el valor numérico de una sola unidad de carga eléctrica. En su experimento, Millikan roció pequeñas gotas de aceite en una cámara



entre placas con carga eléctrica: en un campo eléctrico. Cuando el campo era intenso, algunas de las gotas se movían hacia arriba, lo que indicaba que portaban una carga negativa muy ligera. Millikan ajustó el campo de modo que las gotas flotaran sin movimiento. Sabía que la fuerza descendente de la gravedad sobre las gotas se equilibraba exactamente con la fuerza eléctrica ascendente. La investigación demostró que la carga sobre cada gota siempre era algún múltiplo de un solo valor muy pequeño, que él propuso como la unidad fundamental de carga que portaba cada electrón. Con este valor y la razón entre masa y carga descubierta por Thomson, Millikan calculó la masa de un electrón en aproximadamente 1/2,000 la masa del átomo más ligero conocido, el hidrógeno. Esto confirmó la idea de Thomson de que el electrón era ligero y estableció la unidad cuántica de carga. Por su trabajo en física, Millikan recibió el Premio Nobel en 1923.

F I G U R A 3 2 . 5

1 Una neblina de gotas de

2 Las gotas caen por la

Experimento de la gota de aceite de

aceite se inyecta en

gravedad, y algunas caen a

Millikan para determinar la carga del

la cámara superior.

través de un orificio de la

placa con carga positiva.

electrón.

Gota de aceite observada (−)

Placa con carga (+)

Campo eléctrico

ajustable

Placa con carga (−)

Microscopio

3 El campo eléctrico se ajusta hasta que una gota flota.

La fuerza eléctrica ascendente ejercida sobre la gota

por la placa con carga positiva se equilibra de manera

exacta con la fuerza descendente de la gravedad ejercida

sobre la gota.

Si los átomos contienen electrones con carga negativa, es razonable pensar que los El electrón fue la primera de

átomos también deben contener alguna materia con carga positiva que los equilibre.

muchas partículas fundamentales

J. J. Thomson propuso lo que llamó modelo del "pudín de pasas" del átomo, en el que que se descubrieron.

los electrones son como pasas en un mar de pudín con carga positiva. La experimentación de Rutherford y el experimento de la lámina de oro, mencionado antes, demostraron que este modelo era erróneo.

32.3 Espectros atómicos: pistas para

la estructura atómica

Durante el periodo de los experimentos de Rutherford, los químicos usaban el espectroscopio (estudiado en el Capítulo 30) para el análisis químico, en tanto que los físicos estaban muy ocupados

tratando de encontrar orden en los confusos arreglos de las líneas espectrales. Desde hacía mucho se sabía que el elemento más ligero, el hidrógeno, tenía un espectro mucho más ordenado que los demás elementos (Figura

32.6). Una importante secuencia de líneas del espectro del hidrógeno

comienza con una línea en la región roja, seguida de una en la azul, luego varias líneas en el violeta, y muchas en el ultravioleta. El espaciamiento entre líneas sucesivas se vuelve cada vez más pequeño de la primera en el F I G U R A 3 2 . 6

rojo a la última en el ultravioleta, hasta que las líneas se juntan tanto que parecen fun-Una porción del espectro del hidrógeno.

dirse. Un profesor suizo, Johann Jakob Balmer, fue el primero en expresar las longitudes Cada línea, una imagen de la rendija en

de onda de estas líneas en una sola fórmula matemática en 1884. Sin embargo, Balmer el espectroscopio, representa luz de una

no pudo ofrecer una razón por la que su fórmula funcionaba tan bien. Su idea de que frecuencia específica emitida por el gas

su fórmula podía extenderse y predecir otras líneas de hidrógeno resultó ser correcta, lo hidrógeno cuando se excita (a la derecha

está la frecuencia más alta).

que condujo a la predicción de líneas que todavía no se habían medido.

Otra regularidad de los espectros atómicos la descubrió el físico y matemático sueco Johannes Rydberg. Él observó que las frecuencias de las líneas en determinadas series de otros elementos seguían una fórmula similar a la de Balmer, y que la suma de las frecuencias de dos líneas en dicha serie solía ser igual a la frecuencia de una tercera línea. Más adelante, el físico suizo Walter Ritz desarrolló esta relación y la convirtió en el principio general conocido como principio de combinación de Ritz. Dicho principio afirma que las líneas espectrales de cualquier elemento incluyen frecuencias que son o la suma o la diferencia de las frecuencias de otras dos líneas.

Al igual que Balmer, Ritz no pudo ofrecer una explicación de esta regularidad. Sin embargo, estas regularidades fueron los indicios que utilizó el físico danés Niels Bohr para entender la estructura del átomo.

32.4 Modelo de Bohr del átomo

En 1913, Bohr aplicó la teoría cuántica de Planck y Einstein al átomo nuclear de Rutherford y formuló el bien conocido modelo planetario del átomo.2 Bohr razonó que los electrones ocupaban estados "estacionarios" (de energía fija, no de posición fija) a F I G U R A 3 2 . 7

diferentes distancias del núcleo y que los electrones podían hacer "saltos cuánticos" de El modelo de Bohr del átomo. Aunque este modelo está muy simplificado,

un estado de energía a otro. Pensó que se emite luz cuando ocurre dicho salto cuántico todavía es útil para comprender la emi-

(de un estado de mayor energía a uno de menor energía). Además, Bohr se dio cuenta de sión de luz.

que la frecuencia de la radiación emitida está determinada por E = hf (en realidad, f = E/ h), donde E es la diferencia en la energía del átomo cuando el electrón está en las Luz

diferentes órbitas. Éste fue un logro importante porque Bohr dijo que la frecuencia de los fotones emitidos no es la frecuencia clásica a la que un electrón vibra sino que, más bien, está determinada por las diferencias de energía en el átomo (como se estudió en el Capítulo 30). A partir de aquí, Bohr pudo dar el siguiente paso y determinar las energías de cada una de las órbitas.

El modelo planetario del átomo de Bohr planteaba una gran pregunta. Los electrones acelerados, de acuerdo con la teoría de Maxwell, irradian energía en forma de Luz

Luz

ondas electromagnéticas. De modo que un electrón que acelera alrededor de un núcleo F I G U R A 3 2 . 8

debe irradiar energía en forma continua. Esta irradiación de energía debe hacer que el De acuerdo con la teoría clásica, un electrón caiga en espiral hacia el núcleo (Figura 32.8). Bohr se apartó osadamente

de electrón que acelera alrededor de su órbita la física clásica y afirmó que el electrón no irradia luz mientras acelera alrededor del debe emitir radiación de manera conti-núcleo en una sola órbita, sino que la irradiación de luz ocurre sólo cuando el electrón nua. Esta pérdida de energía debe hacer realiza una transición de un nivel de energía más alto a uno más bajo. Como se sabe que caiga rápidamente en espiral hacia el núcleo. Pero esto no ocurre.

ahora, el átomo emite un fotón cuya energía es igual a la diferencia en energía entre los dos niveles de energía, E = hf. Como aprendiste en el Capítulo 30, la frecuencia n = 3

del fotón emitido, su color, depende del tamaño del salto. De modo que la cuantiza-3er. nivel de energía

ción de la energía luminosa corresponde perfectamente con la cuantización de la enerA

gía del electrón.

n = 2

Las ideas de Bohr, por extravagantes que parecieran en la época, explicaban las 2o. nivel de energía

regularidades descubiertas en los espectros atómicos. En la Figura 32.9 se muestra la B

C

explicación de Bohr del principio de combinación de Ritz. Si un electrón se eleva hasta n = 1

el tercer nivel de energía, puede regresar a su nivel inicial con un solo salto del tercero Estado base

al primer nivel o con un salto doble, primero al segundo nivel y luego al primer nivel.

Estas dos trayectorias de regreso producirán tres líneas espectrales. Observa que la suma de los dos saltos energéticos a lo largo de las trayectorias A y B es igual al salto F I G U R A 3 2 . 9

energético individual a lo largo de la trayectoria C. Debido a que la frecuencia es pro- Tres de los muchos niveles de energía porcional a la energía, las frecuencias de la luz emitida a lo largo de las

trayectorias A y de un átomo. Un electrón que salta del B, cuando se suman, son iguales a la frecuencia de la luz emitida cuando la transición tercer nivel al segundo nivel (rojo A), y uno que salta del segundo nivel al estado

es a lo largo de la trayectoria C. Ahora puedes ver por qué la suma de dos frecuencias base (verde B). La suma de las energías en el espectro es igual a una tercera frecuencia en el espectro.

(y las frecuencias) de estos dos saltos es

igual a la energía (y la frecuencia) del

2Este modelo, como casi todos los modelos, tiene grandes defectos porque los electrones no dan vueltas en salto sencillo del tercer nivel al estado planos como lo hacen los planetas. El modelo se revisó; las "órbitas" se convirtieron en "capas" y "nubes". El base (azul C).

término órbita se utiliza porque fue, y sigue siendo, de uso común. Los electrones no son sólo cuerpos, como los planetas, sino más bien se comportan como ondas concentradas en determinadas partes del átomo.

Bohr pudo explicar los rayos X en elementos más pesados, y mostró que se emiten cuando los electrones saltan de las órbitas más externas a las más internas. Predijo las frecuencias de los rayos X que luego se confirmaron con experimentos. Bohr también pudo calcular la "energía de ionización" de un átomo de hidrógeno: la energía necesaria para desprender por completo el electrón del átomo. Esto también fue verificado mediante experimentos.

Con las frecuencias medidas de los rayos X, así como de la luz visible, la infrarroja y la ultravioleta, los científicos pudieron mapear los niveles de energía de todos los elementos atómicos. El modelo de Bohr tenía electrones que orbitaban en círculos (o elipses) perfectos organizados en grupos o en capas. Este modelo del átomo explicaba las propiedades químicas generales de los elementos. También condujo al descubrimiento del hafnio.

Bohr resolvió el misterio de los espectros atómicos al tiempo que proporcionaba un modelo extremadamente útil del átomo. Fue rápido para subrayar que su modelo debía interpretarse como un mero comienzo, y la imagen de los electrones dando vueltas alrededor del núcleo como planetas alrededor del Sol no debía tomarse literalmente (hecho al que los divulgadores de la ciencia no pusieron atención). Sus órbitas muy bien definidas eran representaciones conceptuales de un átomo cuya descripción posterior incluía ondas: mecánica cuántica. Sus ideas de los saltos cuánticos y frecuencias proporcionales a las diferencias de energía siguen siendo parte de la teoría moderna de hoy.

PUNTODECONTROL

1. ¿Cuál es el número máximo de trayectorias de desexcitación disponibles para un átomo de hidrógeno excitado al nivel 3 y que cambia al estado base?

2. Dos líneas espectrales predominantes en el espectro de hidrógeno, una infrarroja y una roja, tienen frecuencias de 2.7 3 1014 Hz y 4.6 3 1014 Hz, respectivamente. ¿Puedes predecir una línea con frecuencia más alta en el espectro del hidrógeno?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. Dos (un solo salto y un salto doble), como se muestra en la Figura 32.9.

2. La suma de las frecuencias es 2.7 1014 + 4.6 3 1014 = 7.3 1014 Hz, que resulta ser la frecuencia de una línea violeta en el espectro del hidrógeno. Con la Figura 32.9

como modelo, ¿puedes ver que si la línea infrarroja se produce por una transición similar a la trayectoria A y la línea roja corresponde a la trayectoria B, entonces la línea violeta corresponde a la trayectoria C?

32.5 Explicación de los niveles de energía

cuantizados: ondas de electrones

En el Capítulo 11 se estudiaron los diferentes tamaños de los átomos; esto se mostró en la Figura 11.10. En el Capítulo 30 se analizaron la excitación atómica y cómo los átomos emiten fotones cuando sus electrones hacen transiciones entre niveles de energía. La idea de que los electrones pueden ocupar ciertos niveles de energía fue muy
VIDEO: Ondas de electrones

sorprendente para los primeros investigadores y para el mismo Bohr. Fue sorprendente porque el electrón al principio se consideró como análogo a una partícula, una pequeña munición, que daba vueltas al núcleo como un planeta da vueltas alrededor del Sol. Así como un satélite puede orbitar a cualquier distancia del Sol, parecería que un electrón podría orbitar alrededor del núcleo a cualquier distancia radial, dependiendo, desde luego, como en el satélite, de su rapidez. Moverse entre todas las órbitas permi-tía a los electrones emitir todas las energías de luz. Pero esto no sucede (recuerda la Figura 32.8). Para entender por qué el electrón ocupa sólo niveles discretos hay que considerar al electrón no como una partícula, sino como una onda.

C A PÍ T U LO 32 EL ÁTO M O Y EL CUA N TO

609

Louis de Broglie introdujo el concepto de ondas de materia en 1924. Planteó la hipótesis de que una onda se asocia a cada partícula y que la longitud de onda de una onda de materia se relaciona de forma inversa a la cantidad de movimiento de la partícula. Estas ondas de materia se comportan igual que otras ondas; pueden reflejarse, refractarse, difractarse y hacer que interfieran. Con la idea de la interferencia, De Broglie demostró que los valores discretos de los radios de las órbitas de Bohr son una consecuencia natural de las ondas electrónicas estacionarias. Una órbita de Bohr existe donde una

(a)

(b)

onda electrónica se cierra sobre sí misma de manera constructiva.

La onda electrónica actúa como una onda estacionaria, como una onda sobre una cuer- ***F I G U R A 3 2 .1 0***

da musical. De acuerdo con esta visión, el electrón se considera no como una partícula (a) Un electrón que orbita forma una onda estacionaria sólo cuando la cir-ubicada en algún punto en el átomo, sino como si su masa y carga estuvieran dispersas cunferencia de su órbita es igual a un en una onda estacionaria que rodea al núcleo atómico, con un número entero de lon- múltiplo entero de la longitud de onda.

gitudes de onda que encajan en forma equitativa en las circunferencias de las órbitas (b) Cuando la onda no se cierra sobre sí (Figura 32.10). La circunferencia de la órbita más interna, de acuerdo con esta imagen, misma en fase, experimenta una interfe-es igual a una longitud de onda. La segunda órbita tiene una circunferencia de dos longi- rencia destructiva. Por tanto, las órbitas tudes de onda de electrón, la tercera tiene tres, y así sucesivamente (Figura 32.11). Esto es sólo existen donde las ondas se cierran similar a un collar de clips. Sin importar de qué tamaño se haga el collar, su circunferen- sobre ellas mismas en fase.

cia es igual a algún múltiplo de la longitud de un solo clip.3 Dado que las circunferencias de las órbitas electrónicas son discretas, entonces los radios de dichas órbitas y, por tanto, los niveles de energía, también son discretos.

Las circunferencias de las órbitas de

los electrones de n = 1 a

n = 1

n = 4 se muestran

F I G U R A 3 2 . 1 1

“extendidas y aplanadas”.

Las órbitas de los electrones en un

átomo tienen radios discretos porque

n = 2

las circunferencias de las órbitas son

múltiplos enteros de la longitud de onda

del electrón. Esto resulta en un estado

de energía discreto para cada órbita. (La

n = 3

figura está muy simplificada porque las

ondas estacionarias constituyen capas

esféricas y elipsoidales y no planas y

n = 4

circulares.)

Este modelo explica por qué los electrones no caen en espiral hacia el núcleo, lo que haría que los átomos se encogieran al tamaño del pequeño núcleo. Si cada órbita electrónica se describe mediante una onda estacionaria, entonces las circunferencias de la órbita más pequeña puede no ser más pequeña que una longitud de onda: en una onda SCREENCAST: Ondas de materia

estacionaria circular (o elíptica) no es posible una fracción de una longitud de onda. En tanto el electrón porte la cantidad de movimiento necesaria para el comportamiento ondulatorio, los átomos no se encogen sobre ellos mismos.

En el todavía más moderno modelo ondulatorio del átomo, las ondas de electrones se mueven no sólo alrededor del núcleo, sino también hacia adentro y hacia afuera, acercándose y alejándose del núcleo. La onda electrónica se dispersa en tres dimensiones, lo que conduce a la imagen de una "nube" de electrones. Como verás, esta es una nube de probabilidad, no una nube constituida de electrones pulverizados dispersos en el espacio. El electrón, cuando se detecta, sigue siendo una partícula puntual.

3Para cada órbita, el electrón tiene una rapidez única, que determina su longitud de onda. Las rapideces de los electrones son menores, y las longitudes de onda son más grandes, a medida que los radios de las órbitas crecen, de modo que, para que la analogía sea exacta, se tiene que usar no sólo más clips para hacer collares cada vez más largos, sino también clips cada vez más grandes.

32.6 Mecánica cuántica

A mediados de la década de 1920 ocurrieron muchos cambios en la física. No sólo se estableció experimentalmente la naturaleza corpuscular de la luz, sino también se descubrió que las partículas de materia tenían propiedades ondulatorias. A partir de las ondas de materia de De Broglie, el físico austriaco Erwin Schrödinger formuló una ecuación que describe cómo cambian las ondas de materia bajo la influencia de fuerzas externas. La ecuación de Schrödinger tiene la misma importancia en la mecánica cuántica que la que tiene la ecuación de Newton (aceleración = fuerza/masa) en la física clásica.4 Las ondas de materia en la ecuación de Schrödinger son entidades matemáticas que no son directamente observables, de modo que la ecuación proporciona un modelo meramente matemático, y no uno visual, del átomo, lo que la coloca fuera Erwin Schrödinger (1887-1961)

del ámbito de este libro. Así que esta discusión será breve.5

En la ecuación de onda de Schrödinger, la cosa que "ondula" es la inmaterial amplitud de onda de materia: una entidad matemática llamada función de onda, representada por el símbolo ψ (la letra

griega psi minúscula). La función de onda determinada por la ecuación de Schrödinger representa las posibilidades que pueden ocurrir en un sistema. Por ejemplo, el electrón en un átomo de hidrógeno puede estar en cualquier parte que va desde el centro del núcleo hasta una distancia radial lejana. La posición posible de un electrón y su posición probable en un momento particular no son lo mismo. Para calcular su posición probable, un físico multiplica la función de onda por sí misma ($|\psi|2$). Esto produce una segunda entidad matemática llamada función de densidad de probabilidad, que, en un tiempo dado, indica la probabilidad por unidad de volumen para cada una de las posibilidades representadas por ψ.

Experimentalmente, hay una probabilidad finita (cuantificación de una posibilidad) de encontrar un electrón en una región particular en cualquier instante. El valor de esta probabilidad se encuentra entre los límites 0 y 1, donde 0 indica nunca y 1 indica siempre. Por ejemplo, si la probabilidad de encontrar el electrón dentro de cierto radio es 0.4, esto significa un 40% de probabilidad de que el electrón exista ahí. De modo que la ecuación de Schrödinger no le indica a un físico dónde puede encontrarse un electrón en un átomo en todo momento, sino sólo la probabilidad de encontrarlo ahí; o, en el caso de un número grande de mediciones, qué fracción de esas mediciones encontrará al electrón en cada región. Cuando la posición de un electrón en su nivel (estado) energético de Bohr se mide en repetidas ocasiones y cada una de sus posiciones se grafica como un punto, el patrón resultante parece una especie de nube de electrones (Figura 32.12). Cada electrón puede, en diferentes momentos, detectarse en alguna parte de esta nube de probabilidades; incluso tiene una probabi-F I G U R A 3 2 . 1 2

lidad en extremo pequeña, pero finita, de existir momentáneamente en el interior del La distribución de probabilidades de

núcleo. Sin embargo, la mayor parte del tiempo se detecta a una distancia promedio una nube de electrones para un estado

del núcleo que coincide con el radio orbital descrito por Niels Bohr.

excitado particular.

La mayoría de los físicos, pero no todos, ven la mecánica cuántica como una teoría fundamental de la naturaleza. Es muy interesante que Albert Einstein, uno de los fundadores de la física cuántica, nunca la aceptara como fundamental; él consideraba la naturaleza probabilística de los fenómenos cuánticos como el resultado de una

física más profunda, aunque todavía no descubierta. Afirmó: "Sin duda que la mecánica cuántica es impresionante. Pero una voz interior me dice que todavía no es lo verdadero.

La teoría dice mucho, pero en realidad no nos acerca más al secreto del 'Viejo'".6

U2

*0*Ψ

4La ecuación de onda de Schrödinger, estrictamente para matemáticos, es c ∇*2 U d* Ψ *i U*

.

2 m

0 t

5El breve abordaje de este tema complejo difícilmente conduce a una comprensión auténtica de la mecánica cuántica. Cuando mucho, sirve como un breve vistazo y una posible introducción a más estudio. Por ejemplo, lee el libro de Ken Ford The Quantum World: Quantum Physics for Everyone (El mundo cuántico. Física cuántica para todos) (Harvard University Press, edición de bolsillo, 2005).

6 Aunque Einstein no practicaba religión alguna, con frecuencia invocaba a Dios como el "Viejo" en sus decla-raciones sobre los misterios de la naturaleza.

C A PÍ T U LO 32 EL ÁTO M O Y EL CUA N TO

611

F I G U R A 3 2 . 1 3

Del modelo del átomo de Bohr, al

modelo modificado con ondas de De

Broglie, al modelo ondulatorio con los

2

∆ 2

0

electrones distribuidos en una “nube”

[–

+ U] =i

2 m

0 t

por todo el volumen atómico.

P U N T O D E C O N T R O L

1. Considera 100 fotones que se difractan a través de una delgada rendija para formar un patrón de difracción. Si detectas cinco fotones en cierta región en el patrón, ¿cuál es la probabilidad (entre 0 y 1) de detectar un fotón en esta región?

2. Supón que abres una segunda rendija idéntica y el patrón de difracción tiene bandas claras y oscuras. Supón que la región donde antes golpeaban cinco fotones ahora no contiene ninguno. Una teoría ondulatoria dice que las ondas que golpeaban antes ahora se cancelan por ondas provenientes de la otra rendija: que las crestas y los valles se combinan en cero. Pero la medición es de fotones que o golpean o no golpean.

¿Cómo resuelve esto la mecánica cuántica?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. Se tiene aproximadamente una probabilidad de 0.05 de detectar un fotón en esta posición. La verdadera probabilidad podría ser un poco mayor o menor que 0.05.

Considerar algo como imposi-

Dicho de otra forma, si la verdadera probabilidad es 0.05, entonces el número ble puede reflejar una falta de

detectado podría ser un poco mayor o menor que 5.

comprensión, como cuando los

2. La mecánica cuántica dice que los fotones se propagan como ondas y se absorben científicos pensaban que nunca

como partículas; la probabilidad de absorción es gobernada por los máximos y podría verse un solo átomo. O

puede representar una compren-

mínimos de interferencia ondulatoria. En el lugar donde la onda

combinada de dos sión profunda, como cuando

rendijas tiene una amplitud cero, la probabilidad de que una partícula sea absorbi-los científicos (¡y la oficina de

da es cero.

patentes!) rechazan las máquinas

de movimiento perpetuo.

32.7 Principio de correspondencia

El principio de correspondencia es una regla general no sólo para la buena ciencia, sino para toda buena teoría, incluso en áreas tan alejadas de la ciencia como el gobierno, la religión y la ética. Si una teoría nueva es válida, debe dar cuenta de los resultados verificados de la teoría antigua. Este es el principio de correspondencia, articulado por primera vez por Bohr. La teoría nueva y la teoría anterior deben corresponder; esto es: se deben traslapar y concordar en la región donde los resultados de la teoría anterior están completamente verificados.

Bohr introdujo el principio de correspondencia en relación con su teoría del átomo de hidrógeno de 1913. Razonó que, cuando un electrón está en un estado enormemente excitado y orbita lejos del núcleo atómico, su comportamiento debe parecerse (corresponder) al comportamiento clásico. Y de hecho cuando un electrón en dicho estado muy excitado hace una serie de saltos cuánticos, de un estado al siguiente más bajo y así en dirección descendente, entonces emite fotones de frecuencia cada vez mayor que coinciden con su propia frecuencia de movimiento. Parece caer en espiral hacia adentro, como lo predice la física clásica.

Cuando las técnicas de la mecánica cuántica se aplican a sistemas todavía más grandes, los resultados son en esencia idénticos a los de la mecánica clásica. Los dos dominios

BOSÓN DE HIGGS

En el Capítulo 4 estudiaste la masa, una propiedad de la buscar la partícula que fuera una manifestación misma del campo.

materia que se resiste a los cambios de movimiento. Si pateas

Todos los campos tienen partículas asociadas: el fotón del campo

un balón de soccer y una bola de boliche, es fácil sentir las

electromagnético, el gravitón del campo gravitacional, y así

diferentes resistencias al movimiento. La bola de boliche, con su

sucesivamente. Para verificar el campo Higgs, los físicos calcularon

mayor masa, tiene una mayor resistencia. ¿De dónde proviene esta

que debería haber una partícula muy masiva con carga cero y espín

resistencia? Ésta no era una pregunta que los físicos plantearan en la cero: un bosón. (Hay dos tipos de partículas fundamentales: bosones

primera mitad del siglo XX. La masa sólo estaba ahí, una propiedad sin espín y fermiones, como el electrón, con espín.)

de casi todas las partículas y, por tanto, de los objetos más grandes La búsqueda del "bosón de Higgs", como llegó a llamarse dicha

construidos con dichas partículas. Pero en la década de 1960, los

partícula, duró varias décadas. Finalmente, el 4 de julio de 2012,

teóricos construyeron lo que parecía ser una teoría satisfactoria de

los científicos del Gran Colisionador de Hadrones del laboratorio

todas las partículas fundamentales, pero tenía un serio defecto:

CERN de Ginebra, Suiza, anunciaron el descubrimiento de una

predecía que todas las partículas, no sólo el fotón, carecían de masa.

partícula que tenía todas las propiedades esperadas y una masa 133

¿Qué hacer? Rechazar la teoría era una posibilidad, pero los físicos

veces la del protón (que, a su vez, es casi 2,000 veces la masa de un estaban cautivados con la belleza matemática.

electrón). Menos de un año después, el 14 de marzo de 2013, la

En 1964, el físico escocés Peter Higgs (a quien pronto se

evidencia experimental confirmó el bosón de Higgs.

unieron otros con ideas similares) sugirió una salida. Un nuevo

La comunidad científica está eufórica porque el descubrimiento

campo que llenara todo el espacio podría proporcionar una especie

de esta partícula esquiva respalda el "modelo estándar" de partículas de "viscosidad" que imbuiría a las partículas con masa. Esto llegó

fundamentales y brinda la esperanza de que los físicos estén en

a llamarse el "campo Higgs" y los físicos estuvieron inclinados a

camino de algún día comprender la gravedad de un modo más

creer en él. Sin embargo, verificar su existencia era un problema

profundo y aprender más de la materia oscura y de la energía oscura

monumental. Para encontrar un campo subatómico había que

(que se analizaron en forma breve en el Capítulo 9).

se mezclan cuando la longitud de onda de De Broglie es pequeña comparada con las dimensiones del sistema o de los pedazos de materia en el sistema. Es satisfactorio saber que la teoría cuántica y la teoría clásica, que hacen predicciones por completo diferentes al nivel de un solo átomo, se combinen sin dificultades en una descripción de la naturaleza que se extiende desde las cosas más pequeñas hasta las más grandes en el Universo.

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)

***Núcleo atómico.** El centro con carga positiva de un átomo, que por*

Werner Heisenberger (1925) y Erwin Schrödinger

contiene protones y neutrones y casi toda la masa del átomo,

(1926).

pero sólo una pequeña fracción de su volumen.

Ecuación de onda de Schrödinger. Ecuación fundamental de

Electrón. La partícula negativa en la parte exterior de un átomo.

la mecánica cuántica que relaciona las amplitudes de la onda

Principio de recombinación de Ritz. Enunciado que dice

de probabilidad con las fuerzas que actúan sobre el sistema.

que las frecuencias de algunas líneas espectrales de los

Es tan básica para la mecánica cuántica como las leyes de

elementos son las sumas o las diferencias de las frecuencias

movimiento de Newton lo son para la mecánica clásica.

de otras dos líneas.

Principio de correspondencia. Regla que establece que una

Mecánica cuántica. Teoría del micromundo que está basada en

teoría nueva debe producir los mismos resultados que la teo-

funciones de onda y probabilidades, desarrol ada en especial

ría vieja donde se sabe que es válida la teoría anterior.

C A PÍ T U LO 32 R E V ISI Ó N

613

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N) 32.1 Descubrimiento del núcleo atómico

12. ¿Cuál es la relación entre las diferencias de energía de las

1. ¿Por qué la mayoría de las partículas alfa disparadas hacia

órbitas en un átomo y la luz emitida por el átomo?

una lámina de oro salen casi sin desviarse?

32.5 Explicación de los niveles de energía

2. ¿Qué descubrió Rutherford sobre el núcleo atómico?

cuantizados: ondas de electrones

32.2 Descubrimiento del electrón

13. ¿De qué manera tratar al electrón como una onda y no

3. ¿Qué postuló Benjamín Franklin sobre la electricidad?

como una partícula resuelve el acertijo de por qué las

órbitas de los electrones son discretas?

4. ¿Qué es un rayo catódico?

14. De acuerdo con el modelo simple de De Broglie, ¿cuántas

5. ¿Qué propiedad de un rayo catódico se hace evidente

longitudes de onda existen en una onda electrónica en la

cuando un imán se acerca al tubo?

primera órbita? ¿En la segunda órbita? ¿En la n-ésima órbita?

6. ¿Qué descubrimiento de J. J. Thomson le hizo ganar el

15. ¿Cómo puedes explicar por qué los electrones no caen en

Premio Nobel?

espiral hacia el núcleo que los atrae?

7. ¿Qué descubrió Robert Millikan acerca del electrón?

32.6 Mecánica cuántica

32.3 Espectros atómicos: pistas para la estructura

atómica

16. ¿Qué representa la función de onda ψ?

8. ¿Qué descubrió Johann Jakob Balmer del espectro del

17. ¿Cómo es que la función de densidad de probabilidad

hidrógeno?

difiere de la función de onda?

9. ¿Qué descubrieron Johannes Rydberg y Walter Ritz de los

18. ¿Cómo es que la nube de probabilidades del electrón en

espectros atómicos?

un átomo de hidrógeno se relaciona con la órbita descrita

por Niels Bohr?

32.4 Modelo de Bohr del átomo

32.7 Principio de correspondencia

10. ¿Qué relación postuló Bohr entre las órbitas de los

electrones y la emisión de luz?

19. ¿Qué es exactamente lo que se "corresponde" en el

principio de correspondencia?

11. De acuerdo con Niels Bohr, ¿es posible que un solo

electrón en un estado excitado ceda más de un fotón

20. ¿La ecuación de Schrödinger sería válida si se aplicara al

cuando salta a un estado energético más bajo?

sistema solar? ¿Sería útil?

P I E N S A Y E X P L I C A (S Í N T E S I S)

21. Considera los fotones emitidos de una lámpara ultravioleta

espectroscopio. Si el espaciamiento energético entre los niveles

y un transmisor de televisión. ¿Cuál tiene la mayor (a)

fuese igual, ¿esto afectaría el número de líneas espectrales?

longitud de onda, (b) energía, (c) frecuencia y (d) cantidad

29. En términos de longitud de onda, ¿cuál es la órbita más

de movimiento?

pequeña que puede tener un electrón alrededor del núcleo

22. ¿Qué color de luz es el resultado de una mayor transición

atómico?

energética: el rojo o el azul?

30. ¿Cuál explica mejor el efecto fotoeléctrico: la naturaleza

23. ¿De qué forma el experimento de dispersión de la lámina

corpuscular o la naturaleza ondulatoria del electrón?

de oro de Rutherford demostró que el núcleo atómico es

¿Cuál explica mejor los niveles discretos en el modelo de

pequeño y muy masivo?

Bohr del átomo? Defiende tus respuestas.

24. ¿Cómo es que el modelo del átomo de Rutherford explica

31. ¿Cómo es que el modelo ondulatorio de los electrones que

la dispersión hacia atrás de las partículas alfa dirigidas

orbitan el núcleo explica los valores de energía discretos

a la lámina de oro?

en lugar de un intervalo continuo de valores de energía?

25. En la época del experimento de la lámina de oro de

32. ¿Por qué el helio y el litio muestran comportamientos

Rutherford, los científicos sabían que en el interior del

químicos muy diferentes, aun cuando sólo difieren por

átomo había electrones con carga negativa, pero no sabían

un electrón? ¿Por qué esta pregunta está en este capítulo y

dónde residía la carga positiva. ¿Qué información acerca de

no en el Capítulo 11?

la carga positiva proporcionó el experimento de Rutherford?

33. El principio de combinación de Ritz puede considerarse

26. ¿Por qué a las líneas espectrales a menudo se les

como un enunciado de la conservación de energía. Explica.

denomina "huellas digitales atómicas"?

34. ¿El modelo de De Broglie afirma que un electrón

27. Cuando un electrón hace una transición de su primer

debe moverse con la finalidad de tener propiedades

nivel cuántico al estado base, la diferencia de energía la

ondulatorias? Defiende tu respuesta.

porta el fotón emitido. En comparación, ¿cuánta energía

35. ¿Por qué una órbita electrónica estable que consista en

se necesita para regresar un electrón en su estado base al

una circunferencia de 2.5 longitudes de onda de De

primer nivel cuántico?

Broglie no existe en ningún átomo?

28. La Figura 32.9 muestra tres transiciones entre tres niveles

36. Una órbita es una trayectoria perceptible que sigue un

de energía que producirían tres líneas espectrales en un

objeto en su revolución alrededor de otro objeto. Un

E S V

I EN

E T E

A

F T

Í O

SI M

C I

A C A

S A N

T D N

Ó M I U

C CL E A

A Y NR

U P

C H

L Y

E S

A IRCS

orbital atómico es un esparcimiento electrónico sobre

42. ¿Cuándo y dónde se traslapan las leyes de movimiento de

un volumen de espacio en el que es más probable que el

Newton y la mecánica cuántica?

electrón se encuentre. ¿Qué tienen en común las órbitas y

43. ¿Qué dice el principio de correspondencia de Bohr sobre los orbitales?

la mecánica cuántica y la mecánica clásica?

37. ¿Una partícula puede difractarse? ¿Puede presentar

44. ¿El principio de correspondencia tiene aplicación para interferencia?

eventos macroscópicos en el macromundo cotidiano?

38. ¿Cuál es la relación entre la amplitud de una onda de

45. ¿Qué tiene que ver la naturaleza ondulatoria de la materia materia y la probabilidad?

con el hecho de que uno no puede atravesar paredes

39. Si la constante de Planck, h, fuera más grande, ¿los sólidas, como suelen mostrar las películas de Hollywood átomos también serían más grandes? Defiende tu usando efectos especiales?

respuesta.

46. La grandeza o la pequeñez sólo tienen significado en

40. ¿Qué es lo que ondula en la ecuación de onda de relación con algo más. ¿Por qué generalmente la rapidez Schrödinger?

de la luz se refiere como "grande" y la constante de

41. Cuando sólo se observan algunos fotones, la física clásica Planck como "pequeña"?

falla. Cuando se observan muchos, la física clásica es

47. Elabora una pregunta de opción múltiple que compruebe

válida. ¿Cuál de estos dos hechos es congruente con el

que un compañero de clase entendió la diferencia entre

principio de correspondencia?

los ámbitos de la mecánica clásica y la mecánica cuántica.

P I E N S A Y D I S C U T E (E V A L U A C I Ó N)

48. Si el electrón en un átomo de hidrógeno obedeciera

52. ¿Por qué la física clásica predice que los átomos deben

la mecánica clásica en lugar de la mecánica cuántica,

colapsarse?

¿emitiría un espectro continuo o un espectro de líneas?

53. ¿Einstein apoyaba la mecánica cuántica como física

Explica.

fundamental, o pensaba que la mecánica cuántica estaba

49. ¿Cómo es que los elementos con números atómicos bajos

incompleta?

pueden tener tantas líneas espectrales?

54. Richard Feynman, en su libro El carácter de las leyes

50. Si el mundo del átomo es tan incierto y sujeto a las leyes

físicas, afirma: "Un filósofo dijo una vez, 'es necesario

de la probabilidad, ¿cómo pueden medirse con exactitud

para la existencia misma de la ciencia que las mismas

cosas como la intensidad luminosa, la corriente eléctrica y

condiciones siempre produzcan los mismos resultados'.

la temperatura?

Bien, ¡no lo hacen!". ¿Quién hablaba de física clásica y

51. Cuando se dice que los electrones tienen propiedades

quién hablaba de física cuántica?

de partícula y a continuación se dice que los electrones

tienen propiedades ondulatorias, ¿no existe una

contradicción? Explica.

33 1

C A P Í T U L O 3 3

El núcleo

atómico y la 2

radiactividad

33.1 Los rayos X y la radiactividad

33.2 Rayos alfa, beta y gamma

33.3 Radiación ambiental

3

33.4 El núcleo atómico y la fuerza fuerte

33.5 Vida media radiactiva

33.6 Detectores de radiación

33.7 Transmutación de elementos

33.8 Datación radiométrica

4

1 Stanley Micklavzina utiliza un contador Geiger para medir la radiactividad de un salero de cerámica Fiesta. En la década de 1930 se utilizaba uranio en el vidriado cerámico de las vajil as Fiesta para obtener el color rojizo. 2 El decaimiento radiactivo en el interior de la Tierra calienta el agua que alimenta los manantiales térmicos de todo el mundo. Estos manantiales impresionantes, cargados con carbonato de calcio, se encuentran en Pamukkale, Turquía. 3 El profesor de la University of Melbourne, Roger Rassool, utiliza un contador de centel eo para mostrar que las trayectorias de los rayos gamma no son afectadas por un campo magnético, como se ilustra en la Figura 33.3. 4 Leilah McCarthey explica la vida media radiactiva a sus alumnos del City Col ege de San Francisco.

E ES V

I E

E N

T E

AT

F O

ÍSI M

C I

A C

S A

A N D

TÓ N

M I U

C CL

A E A

Y NR P

U C H

L Y

E S

A IRCS

compartieron el Premio Nobel de Física con Henri Bec-

¿Qué físico ganó dos Premios Nobel, uno de física y otro de química, y tuvo una hija que también ganó un Premio querel por su trabajo con la radiactividad. Algunas fuentes

Nobel de Química? La respuesta es Madame Curie. Naci-

dicen que los Curie compartieron el dinero del premio con

da en 1867 con el nombre de Marie Sklodowska, en Varsovia,

conocidos necesitados, incluidos algunos alumnos. La Sor-

entonces parte del Imperio Ruso, recibió su educación general

bona de París rindió homenaje a Pierre con una cátedra y

en escuelas de la localidad con un poco de instrucción científica impartida por su padre, un profesor de secundaria. Alen-

un laboratorio del que Marie fue directora.

En 1906, una carreta tirada por cabal os golpeó a Pierre

tada por su hermana mayor, cuando cruzaba la cal e bajo la lluvia. Pierre cayó bajo las rue-Bronislawa, quien era médico das y murió de una fractura de cráneo. Marie estaba devas-y se había mudado a París,

tada por la muerte de su esposo. El departamento de física

Marie también se mudó al í de la Sorbona encomendó a Marie el puesto de Pierre. El a para continuar sus estudios en

fue la primera mujer profesora de la Sorbona, donde continuó

la Sorbona. Ahí vivió en un su trabajo y obtuvo el Premio Nobel de Química en 1911.

desván rústico, que el a eligió También fue nombrada Directora del Laboratorio Curie del porque era costeable y estaba Instituto de Radio de la Université de Paris, fundado en 1914.

cerca de la universidad. En

Durante la Primera Guerra Mundial donó sus meda-

1894, después de obtener su llas de oro del Premio Nobel para las actividades de la primer grado, conoció al amor

guerra. En 1921 fue recibida triunfalmente en su prime-

de su vida, el profesor de física

ra visita a Estados Unidos, donde recaudó fondos para la

Marie Curie

Pierre Curie. En 1895 se casa-

investigación del radio. En 1929 recorrió de nuevo Esta-

(1867-1934)

ron y pronto comenzaron a dos Unidos, cuando el presidente Hoover le entregó un trabajar juntos.

cheque por US$50,000, suficientes para comprar 1 gramo

En 1896, el físico francés Henri Becquerel descubrió de radio para el Instituto de Radio de París.

que las sales de uranio emitían rayos parecidos a los rayos

Madame Curie visitó Polonia por última vez en 1934.

X por su capacidad de penetrar en la materia sólida. Marie

Un par de meses después murió, es probable que por la

y Pierre comenzaron a investigar el uranio. Fueron quienes

exposición excesiva a la radiación que soportó durante su

acuñaron la palabra radiactividad, que se convirtió, para vida de trabajo. En aquella época no se comprendían por Marie, en el trabajo de su vida. Por aquel a época (1898),

completo los efectos dañinos de la radiación ionizante.

con la ciudadanía francesa, Marie, en honor a su país natal,

Fue enterrada en el cementerio de Sceaux, junto a su espo-

le puso el nombre de polonio al primer nuevo elemento quí-

so Pierre. Sesenta años después, en 1995, en homenaje a

mico que el a y Pierre descubrieron. También descubrieron

sus logros, los restos de ambos se transfirieron al Panthéon

y nombraron al elemento radio. En 1903, Pierre y Marie

de París. Ella fue la primera mujer en recibir tal honor.

33.1 Los rayos X y la radiactividad

La investigación más profunda del átomo comenzó en 1895, cuando el físico alemán Hasta el momento se ha abordado

la física atómica, el estudio de las

Wilhelm Roentgen descubrió los rayos X, rayos de una naturaleza desconocida. Roent-nubes de electrones que constituyen

gen descubrió este "nuevo tipo de rayos" producidos por un haz de "rayos catódicos"

el átomo. Ahora se hurgará por

(después se descubrió que eran electrones) que golpeaba la superficie de vidrio de un debajo de los electrones y en lo

tubo de descarga de gas. Descubrió que los rayos X podían atravesar materiales sólidos, más profundo del átomo, el núcleo

eran capaces de ionizar el aire, no mostraban refracción en el vidrio y no los desviaban atómico, donde las energías dis-los campos magnéticos. En la actualidad se sabe que los rayos X son ondas electromag-ponibles eclipsan aquellas que están

néticas de alta frecuencia, por lo general emitidos por la desexcitación de los electrones disponibles para los electrones. Ésta

es la física nuclear, un tema de gran

orbitales más internos de los átomos. En tanto que la corriente de electrones en una interés público, y de temor público,

lámpara fluorescente excita los electrones externos de los átomos y produce fotones no distinto del temor a la electri-ultravioletas y visibles, un haz de electrones más energético que golpea una superficie cidad hace más de un siglo. Con

sólida excita los electrones más internos y produce fotones de radiación X con una fre-medidas de seguridad y consumi-

cuencia más alta.

dores bien informados, la sociedad

Los fotones de rayos X tienen una energía alta y pueden penetrar muchas capas determinó que los beneficios de la

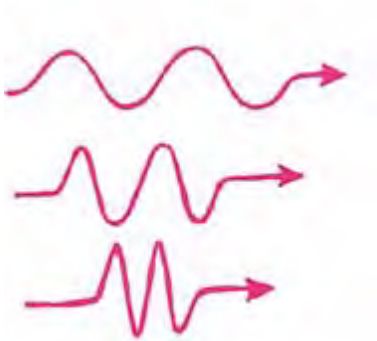
de átomos antes de ser absorbidos o dispersados. Los rayos X hacen esto cuando electricidad superaban sus riesgos.

Lo mismo ocurre en la actualidad

atraviesan tus tejidos blandos y producen una imagen de los huesos dentro de tu con los riesgos de la tecnología

cuerpo (Figura 33.1). En un tubo de rayos X moderno, el blanco del haz de electro-nuclear frente a sus beneficios.

nes es una placa metálica en lugar de la pared de vidrio del tubo.



C A PÍ T U LO 33 EL N Ú CL EO ATÓ M I CO Y L A R A D I AC T I V I DA D

617

F I G U R A 3 3 . 1

100,000 V

Los rayos X emitidos por los átomos

metálicos que se excitan en el elec-

Tubo de

Filamento a 12 V

trodo penetran en la carne con más

rayos X

facilidad que en el hueso y producen

una imagen sobre la película.

Rayos X

Soporte de película oscuro

A principios de 1896, pocos meses después de que Roentgen anunciara su descubrimiento de los rayos X, el físico francés Antoine Henri Becquerel se topó con un nuevo tipo de radiación penetrante. Becquerel estaba estudiando la fluorescencia y la fosforescencia creada tanto por la luz como por los rayos X recién descubiertos, y una SCREENCAST: Radiactividad

tarde dejó una placa fotográfica envuelta dentro de un cajón junto a algunos cristales que contenían uranio. Al día siguiente descubrió para su sorpresa que la placa fotográfica estaba oscurecida, al parecer por una radiación espontánea proveniente del uranio.

Siguió adelante y demostró que esta nueva radiación podía ionizar el aire y difería de los rayos X en que podía desviarse mediante campos eléctricos y magnéticos.

Pronto descubrió que otros elementos emitían rayos similares, como el torio, el actinio y dos nuevos elementos descubiertos por Marie y Pierre Curie: el polonio y el radio. La emisión de estos rayos demostraba que había cambios mucho más drásticos en el átomo que la excitación atómica. Estos rayos, como se evidenció, La radiactividad ha estado presente

eran resultado no de cambios en los estados de energía de los electrones, sino de desde el comienzo de la Tierra.

cambios que ocurrían en el interior del centro del átomo: el núcleo. Este proceso es la radiactividad, que, por implicar el decaimiento del núcleo atómico, con frecuencia se denomina decaimiento radiactivo.

Una idea equivocada frecuente es que la radiactividad es algo nuevo en el ambiente, pero ha estado aquí mucho más tiempo que la especie humana. Forma parte del ambiente tanto como el Sol y la lluvia. Siempre ha estado en el suelo por el que caminas y en el aire que respiras, y es lo que calienta el interior de la Tierra y hace que se funda. De hecho, el decaimiento radiactivo en el interior de la Tierra es lo que calienta el agua que sale de un géiser o sube por los manantiales térmicos naturales. Inclusive el helio del globo de un niño no es más que el producto del VIDEO: Decaimiento radiactivo

decaimiento radiactivo. La radiactividad es tan natural como la luz solar y la lluvia.

33.2 Rayos alfa, beta y gamma

Más de 99.9% de los átomos del ambiente cotidiano son estables. Es poco probable que los núcleos de dichos átomos cambien durante la vida del Universo. Pero algunos tipos de átomos son inestables. Todos los elementos que tienen un número atómico mayor que 82 (plomo) son radiactivos. Estos elementos,

y otros, emiten tres tipos distintos de radiación, llama-

Rayo de luz

F I G U R A 3 3 . 2

dos por las primeras tres letras del alfabeto griego, , ,

Un rayo gamma es parte del espectro

: alfa, beta y gamma.

Rayo X

electromagnético. Es simplemente

Los rayos alfa tienen carga eléctrica positiva, los ra -

radiación electromagnética que tiene

yos beta tienen carga eléctrica negativa y los rayos

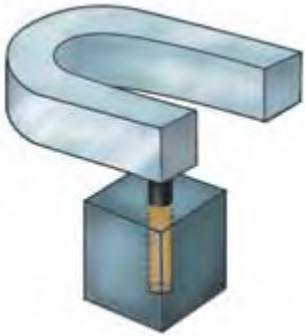
una frecuencia y una energía mucho

Rayo gamma

gamma no tienen carga (Figura 33.2). Los tres rayos pue -

mayores que la luz y los rayos X.

den separarse si se coloca un campo magnético a través



618

PA R T E S I E T E

F ÍSI C A S ATÓ M I C A Y N U CL E A R

Fuente

radiactiva

+

Papel

+

Rayo gamma = luz no visible

con energía ultraalta

Aluminio

Partícula alfa = núcleo de helio

(sin carga eléctrica)

(carga eléctrica +2)

Plomo

F I G U R A 3 3 . 3

Imán

–

Las partículas alfa son las menos

penetrantes y pueden detenerse con

Partícula beta = electrón

unas cuantas hojas de papel. Las par-

(carga eléctrica 21)

tículas beta atraviesan con facilidad el

papel, pero no una hoja de aluminio.

Muestra de radio

Bloque de plomo

Los rayos gamma penetran varios

centímetros en el plomo sólido.

F I G U R A 3 3 . 4

En un campo magnético, los rayos alfa se doblan en un sentido, los rayos beta se doblan en el otro sentido y los rayos gamma no se doblan en absoluto. El haz combinado proviene de una fuente radiactiva colocada en el fondo de un orificio taladrado en un bloque de plomo.

de sus trayectorias (Figura 33.4). Hay otras investigaciones que demuestran que un rayo alfa es un chorro de núcleos de helio y un rayo beta es un chorro de electrones.

Por tanto, con frecuencia se les llama partículas alfa y partículas beta. Un rayo gamma es radiación electromagnética (un chorro de fotones) cuya frecuencia es incluso más alta que la de los rayos X. Mientras que los rayos X se originan en la nube de electrones afuera del núcleo atómico, los rayos alfa, beta y gamma se originan en el núcleo. De modo que, así como la luz se emite por las transiciones entre los niveles de energía en los átomos, los rayos gamma se emiten por transiciones de energía ***F I G U R A 3 3 . 5***

similares en el interior del núcleo atómico. Los fotones gamma ofrecen informa-La vida media de las fresas frescas y

ción de la estructura nuclear, así como los fotones visibles y los de rayos X ofrecen otros perecederos aumenta de manera

información de la estructura electrónica atómica.

importante cuando los alimentos son

expuestos a los rayos gamma prove-

nientes de una fuente radiactiva. Las

fresas de la derecha fueron tratadas

con radiación gamma, que mata los

microorganismos que suelen ocasionar

su descomposición. El alimento sólo es

P U N T O D E C O N T R O L

receptor de la radiación y de ninguna

manera se transforma en emisor de

Supón que te entregan tres rocas radiactivas: una, un emisor alfa; otra, un radiación, como puede confirmarse

emisor beta, y otra, un emisor gamma. Puedes lanzar una, pero de las otras con un detector de radiación.

dos, debes sostener una en la mano y colocar la otra en tu bolsillo. ¿Qué puedes hacer para reducir al mínimo tu exposición a la radiación?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Sostén el emisor alfa en la mano, porque la piel de tu mano te protegerá. Coloca Una vez que las partículas alfa y

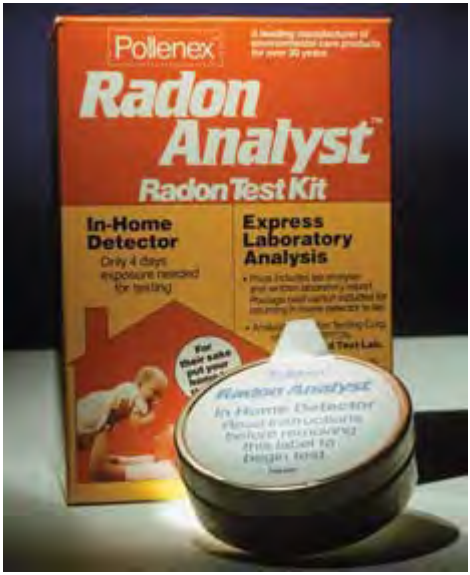
el emisor beta en tu bolsillo, porque es probable que el grosor de tu ropa junto beta se frenan mediante colisio-con el de tu piel detengan las partículas beta. Lanza el emisor gamma, porque pe -

nes, se combinan y se convierten

netraría en tu cuerpo desde cualquiera de las ubicaciones anteriores.

Desde luego, en átomos de helio inofensivos.

lo ideal es que te alejes lo más posible de todas las rocas.



C A PÍ T U LO 33 EL N Ú CL EO ATÓ M I CO Y L A R A D I AC T I V I DA D

619

33.3 Radiación ambiental

Las rocas y minerales comunes del ambiente contienen cantidades significativas de isótopos radiactivos porque muchos contienen pequeñas cantidades de uranio. De hecho, las personas que viven en edificios de ladril o, concreto o piedra están expuestas a mayores cantidades de radiación que las personas que viven en construcciones de madera.

F I G U R A 3 3 . 6

Ambiente natural 75%

(rayos cósmicos, minerales

Orígenes de la exposición a la radia-

terrestres, radón en el aire)

ción para un individuo promedio en

Estados Unidos.

Medicamentos y diagnósticos 15%

Productos

de consumo 2%

Centrales eléctricas de carbón y

Alimentos y agua 8%

plantas de energía nuclear, precipitación

(por ejemplo, potasio)

radiactiva por pruebas de armas

nucleares < 0.003%

La principal fuente de radiación que ocurre de manera natural es el radón-222, un gas inerte que surge de los depósitos de uranio. El radón es un gas pesado que tiende a acumularse en los sótanos después de que se filtra por las grietas del piso. Los niveles de radón varían de una región a otra, de acuerdo con la geología local. Puedes comprobar el nivel de radón en tu casa con un detector de radón (Figura 33.7). Si los niveles son anormalmente altos, se recomiendan medidas correctivas, como sel ar el suelo y las paredes del sótano y mantener una ventilación adecuada.

Aproximadamente un sexto de la exposición anual a la radiación proviene de fuentes no naturales, sobre todo de procedimientos médicos. Los detectores de humo, la precipitación radiactiva de pruebas nucleares realizadas hace mucho tiempo, así como las centrales eléc-

tricas de carbón y la industria de la energía nuclear

también contribuyen. La industria del carbón supera

por mucho a la industria nuclear como fuente de radia -

F I G U R A 3 3 . 7

ción. De manera global, la combustión de carbón libe-

Un kit de prueba de radón doméstico

ra anualmente a la atmósfera alrededor de 13,000 tone-

a la venta en el comercio. Al recipien-

te se le quita el sello en el área que se

ladas de torio y uranio radiactivos. Estos dos minerales

va a muestrear. El radón que se filtra

se encuentran de manera natural en los depósitos de

en el recipiente es absorbido por

carbón, de modo que su liberación es una consecuencia

carbón activado. Después de varios

natural de la quema de carbón. En todo el mundo, las

días el recipiente vuelve a sellarse y se

industrias de energía nuclear generan aproximadamen-

envía a un laboratorio para determi-

te 10,000 toneladas de desechos radiactivos al año. Sin embargo, la mayor parte de nar el nivel de radón.

este desecho está almacenado y no se libera al ambiente.

Unidades de radiación

La dosis de radiación suele medirse en rads (r adiation a bsorbed d ose = dosis de radiación absorbida), una unidad de energía absorbida. Un rad es igual a 0.01 joules de energía radiante absorbida por kilogramo de tejido.

Sin embargo, la capacidad de la radiación nuclear para producir daño no sólo depende de su nivel de energía. Algunas formas de radiación son más dañinas que otras. Por ejemplo, supón que tienes dos flechas, una con una punta afilada y otra con una ventosa en la punta. Dispara ambas flechas hacia una manzana con la misma rapidez y ambas tendrán la misma energía cinética. No obstante, la que tiene la punta afilada invariablemente causará más daño a la manzana que la que tiene la ventosa. De igual manera, algunas formas de radiación causan mayor daño que otras aun cuando se

reciba el mismo número de rads de ambas formas.

620

PA R T E S I E T E

F ÍSI C A S ATÓ M I C A Y N U CL E A R

Partícula

Dosis de radiación

Factor

Efecto a la salud

alfa

1 rad

3

10

5

10 rems

beta

10 rad

3

1

5

10 rems

La unidad de medida de la dosis de radiación basada en el daño potencial es el rem (r oentgen e quivalent m an = roentgen equivalente en un ser humano).1 Para calcular la dosis en rems, se multiplica el número de rads por un factor que corresponde a diferentes efectos en la salud de distintos tipos de radiación determinado por estudios clínicos. Por ejemplo, 1 rad de partículas alfa tiene el mismo efecto biológico que 10 rads de partículas beta.2 A estas dos dosis se les refiere como 10 rems.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Qué es más dañino: estar expuesto a 1 rad de partículas alfa o a 1 rad de partículas beta?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Partículas alfa. Multiplica estas cantidades de radiación por el factor adecuado para obtener las dosis en rems. Alfa: 1 rad 10 10 rems; beta: 1 rad 1 1 rem. Los factores muestran que, en términos fisiológicos, las partículas alfa son 10 veces más dañinas que las partículas beta.

Dosis de radiación

Las dosis letales de radiación comienzan con 500 rems para una dosis de cuerpo entero. Una persona tiene alrededor de 50% de posibilidades de sobrevivir a una dosis F I G U R A 3 3 . 8

de esta magnitud suministrada a todo el cuerpo durante un breve

periodo, como La radiación nuclear se concentra

un día o menos. Durante la radioterapia, un paciente puede recibir dosis localizadas sobre el tejido dañino, como un

que superan los 200 rems diarios durante un periodo de semanas (Figura 33.8).

tumor canceroso, para destruir o

Toda la radiación que recibes de fuentes naturales y de procedimientos de diag-disminuir de tamaño en forma selec-

tiva el tejido en una técnica conocida

nóstico médico sólo es una fracción de 1 rem por año. Por conveniencia se usa la uni-como radioterapia. Esta aplicación

dad más pequeña milirem, donde 1 milirem (mrem) es 1/1,000 de rem. La persona de la radiación nuclear ha salvado

promedio en Estados Unidos está expuesta a más o menos 360 mrem al año, como millones de vidas, un claro ejemplo

indica la Tabla 33.1. Cerca de 80% de esta radiación proviene de fuentes naturales, de los beneficios de la tecnología

como los rayos cósmicos y la Tierra misma. Una radiografía común de tórax expone nuclear. El recuadro muestra el

a una persona a entre 5 y 30 mrem (0.005 a 0.030 rem), menos de un diezmilésimo símbolo internacional que indica que

de la dosis letal. Es interesante que el cuerpo humano sea una fuente significativa de es un área donde se manipula o se

produce material radiactivo.

radiación natural, principalmente por el potasio que se ingiere. Tu cuerpo contiene alrededor de 200 gramos de potasio. La mayor parte del potasio no es radiactivo. Éste es potasio-39, con 19 protones y 20 neutrones en su núcleo. Sin embargo, el potasio-40, con su neutrón adicional, es radiactivo. Los isótopos potasio-39 y potasio-40

son químicamente idénticos, excepto por los efectos de sus diferentes masas. De todo el potasio de tu cuerpo, alrededor de 20 miligramos es el isótopo radiactivo potasio-40, que es un emisor de rayos

gamma. Entre cada latido cardiaco alrededor de 60,000 isótopos de potasio-40 en el cuerpo humano promedio experimentan un decaimiento radiactivo espontáneo. La radiación, en efecto, está en todas partes.

Cuando la radiación se encuentra con las moléculas de estructura intrincada de la solución salina, rica en iones, de las que se componen las células, la radiación puede crear caos a escala atómica. Algunas moléculas se rompen y este cambio altera a las demás moléculas, lo que puede ser nocivo para los procesos vitales.

1Esta unidad se llama así en honor de Wilhelm Roentgen, el descubridor de los rayos X.

2Esto es cierto aun cuando las partículas beta tengan más poder de penetración, como se señaló antes.

C A PÍ T U LO 33 EL N Ú CL EO ATÓ M I CO Y L A R A D I AC T I V I DA D

621

T A B L A 3 3 . 1 EXPOSICIÓN ANUAL A L A R ADIACIÓN

Fuente

Dosis común (mrem) que se recibe anualmente

Origen natural

Radiación cósmica

26

Suelo

33

Aire (radón-222)

198

Tejidos humanos (K-40; Ra-226)

35

Origen humano

Procedimientos médicos

Diagnóstico con rayos X

40

Diagnósticos nucleares

15

Productos de consumo

8

Precipitación radiactiva de pruebas de armas nucleares

1

Plantas eléctricas comerciales de combustible fósil

,1

Plantas de energía nuclear comerciales

!1

Las células pueden reparar mucho del daño molecular causado por la radiación si F I G U R A 3 3 . 9

ésta no es muy fuerte. Una célula puede sobrevivir a una dosis de radiación que nor- Los dosímetros de película que usan Tammy y Larry contienen

malmente sería letal si la dosis se distribuye durante un periodo largo para permitir que alertas sonoras tanto para un pico haya intervalos de curación. Cuando la radiación es suficiente para destruir células, de radiación como para la exposición las células muertas pueden sustituirse con unas nuevas (excepto en el caso de la mayo- acumulada. La información de ría de las células del tejido nervioso, que son irremplazables). En ocasiones una célula los dosímetros individualizados se irradiada sobrevivirá con una molécula de ADN dañada. Las nuevas células que surjan descarga en forma periódica a una a partir de la célula dañada conservarán la información genética alterada, lo que produ- base de datos para su análisis ce una mutación. Por lo general, los efectos de una mutación son insignificantes, pero a y almacenamiento.

veces la mutación resulta en células que no funcionan tan bien como las no afectadas, lo que en ocasiones conduce al cáncer. Si el ADN dañado está en las células reproductoras de la persona, el código genético de su descendencia puede conservar la mutación.

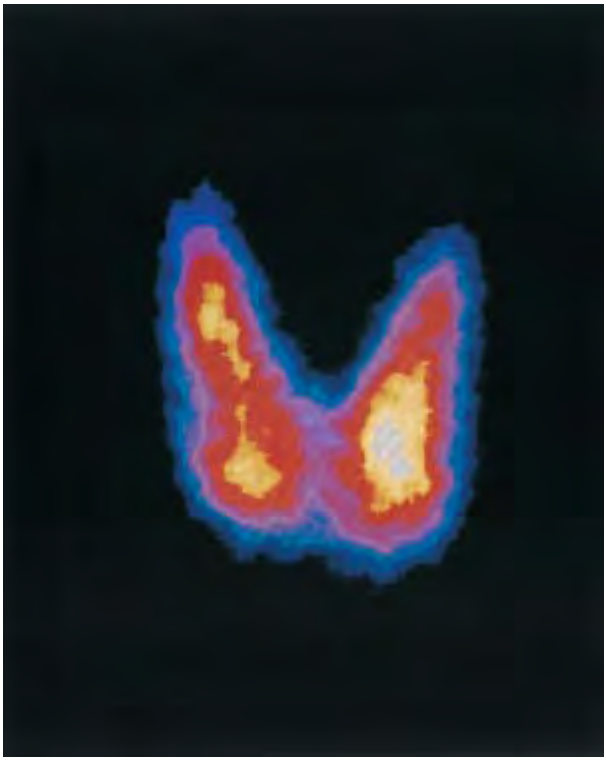
Trazadores radiactivos

En los laboratorios científicos se han producido muestras radiactivas de todos los elementos. Esto se logra mediante el bombardeo con neutrones u otras partículas. Los materiales radiactivos son en extremo útiles en la investigación científica y la industria. Para comprobar la acción de un fertilizante, por ejemplo, los investigadores combinan una pequeña cantidad de material radiactivo con el fertilizante y luego aplican la combinación a algunas plantas. La cantidad de fertilizante radiactivo que sube por las plantas puede medirse de manera fácil con detectores de radiación. Con dichas mediciones, los científicos pueden informar a los campesinos la cantidad adecuada de fertilizante que debe usarse.

Los isótopos radiactivos que se utilizan para rastrear tales rutas se denominan trazadores.

F I G U R A 3 3 . 1 0

Rastreo de la absorción de fertilizante con un isótopo radiactivo.



F I G U R A 3 3 . 1 1

La glándula tiroides, ubicada en el cuello, absorbe mucho del yodo que entra en el cuerpo por los

alimentos y las bebidas. Para obtener imágenes de

la glándula tiroides, como la que se muestra aquí,

se da al paciente una pequeña cantidad del isótopo

radiactivo yodo-131. Estas imágenes permiten

diagnosticar trastornos metabólicos.

En una técnica conocida como diagnóstico médico por imagen, se usan trazadores para el diagnóstico de trastornos internos. Esta técnica funciona porque la trayectoria Entre las partículas fundamentales

que sigue el trazador sólo es influida por sus propiedades físicas y químicas, no por su de la naturaleza están seis tipos de

radiactividad. El trazador puede introducirse solo o junto con alguna otra sustancia quarks, de los cuales dos son los

química que ayude a dirigir el trazador hacia un tipo particular de tejido corporal.

bloques constructores fundamen-

tales de todos los nucleones (proto-

nes y neutrones). Los quarks portan

cargas eléctricas fraccionarias. Un

33.4 El núcleo atómico y la fuerza fuerte

tipo de ellos, el quark arriba (up),

El núcleo atómico ocupa sólo algunas cuatrillonésimas partes del volumen del áto-porta +2/3 la carga del protón, y

otro, el quark abajo (down), tiene

mo, por lo que la mayor parte del átomo es espacio vacío. El núcleo está compuesto 1/3 la carga del protón. (El nom-de nucleones, que es el nombre colectivo para los protones y los neutrones. (Cada bre quark, inspirado por una cita de

nucleón está compuesto de tres partículas más pequeñas llamadas quarks, que se Finnegans Wake, de James Joyce, lo

consideran fundamentales y no compuestos de partes más pequeñas.)

eligió en 1963 Murray Gell-Mann,

Así como hay niveles de energía para los electrones orbitales de un átomo, hay quien propuso por primera vez su

niveles de energía en el interior del núcleo. Mientras que los electrones en órbita existencia.) Los quarks en el protón

emiten fotones cuando realizan transiciones hacia órbitas más bajas, cambios si-son la combinación arriba arriba

milares de estados de energía en los núcleos radiactivos resultan en la emisión de abajo, y en el neutrón, arriba abajo abajo. Los otros cuatro quarks

fotones de rayos gamma. Ésta es la radiación gamma.

llevan los caprichosos nombres de

Se sabe que las cargas eléctricas del mismo signo se repelen. Así que, ¿cómo es extraño (strange), encanto (charm),

posible que los protones, con carga positiva, en el núcleo permanezcan amontonados cima (top) y fondo (bottom).

y juntos? Esta pregunta condujo al descubrimiento de una atracción llamada fuerza Ningún quark ha sido aislado ni

fuerte, que actúa entre todos los nucleones. Esta fuerza es muy intensa, pero sólo observado en forma experimental.

sobre distancias extremadamente cortas (más o menos 1015 m, el diámetro aproxi-La mayoría de los teóricos piensan

mado de un protón o un neutrón). Por otra parte, las interacciones eléctricas de reque los quarks, por su naturaleza,

no pueden aislarse.

pulsión son relativamente de largo alcance. La Figura 33.12 sugiere una comparación de las intensidades de estas dos fuerzas en relación con la distancia. Para los protones que están juntos, como en un núcleo pequeño, la fuerza fuerte de atracción supera con facilidad la fuerza eléctrica de repulsión. Pero para los protones que están sepa-
F I G U R A 3 3 . 1 2

rados, como los que se encuentran en los extremos opuestos de un núcleo grande, la Lecturas de un medidor imagi-fuerza fuerte de atracción puede ser más débil que la fuerza eléctrica de repulsión.

nario que comparan fuerzas: (a) dos

protones cercanos experimentan

tanto una fuerza fuerte de atrac-

Fuerza nuclear fuerte Fuerza eléctrica

Fuerza nuclear fuerte Fuerza eléctrica

ción como una fuerza eléctrica de

(de atracción)

(de repulsión)

(de atracción)

(de repulsión)

repulsión. A esta pequeña distancia

Insignificante Significativa

Insignificante Significativa

Insignificante Significativa

Insignificante Significativa

de separación, la fuerza fuerte supera

a la fuerza eléctrica, y permanecen

juntos. (b) Cuando los protones

0

0

0

0

están separados, la fuerza eléctrica

predomina y se repelen. Esta repul-

+

+

+

sión protón-protón en los núcleos

+

atómicos grandes reduce la estabili-

dad nuclear.

(a)

(b)

C A PÍ T U LO 33 EL N Ú CL EO ATÓ M I CO Y L A R A D I AC T I V I DA D

623

Un núcleo grande no es tan estable como uno pequeño. En un núcleo de helio, por ejemplo, cada uno de los dos protones siente el efecto de repulsión del otro. En un núcleo de uranio, ¡cada uno de los 92 protones siente los efectos de repulsión de los otros 91 protones! El núcleo es inestable. Se observa que existe un límite para el tamaño del Sin la fuerza nuclear fuerte —una

núcleo atómico. Por esta razón los isótopos estables de los átomos más grandes tienen interacción fuerte— no habría

cada vez más neutrones que protones en sus núcleos, y todos los núcleos que tienen más átomos más allá del hidrógeno.

de 82 protones son radiactivos (el número 83, bismuto, apenas lo es).

+

+ +

+

+ +

+

F I G U R A 3 3 . 1 3

+

+

+

(a) Todos los nucleones de un núcleo

atómico pequeño están muy juntos;

+

+

+

+

+

por tanto, experimentan una fuerza

+

+

fuerte de atracción. (b) Los nucleones

+

en lados opuestos de un núcleo más

grande no están tan juntos y, por

tanto, la fuerza fuerte de atracción

que los mantiene juntos es mucho

(a) Nucleones juntos

(b) Nucleones separados

más débil. El resultado es que el

núcleo grande es menos estable.

P U N T O D E C O N T R O L

Dos protones del núcleo atómico se repelen mutuamente, pero también se atraen uno al otro. ¿Por qué?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Dos fuerzas están en acción: la eléctrica y la nuclear. Aunque los protones se repelen eléctricamente uno a otro, también se atraen en forma simultánea por la fuerza fuerte. Cuando la fuerza fuerte de atracción es más intensa que la fuerza eléctrica de repulsión, los protones permanecen unidos. Cuando los protones están separados, la SCREENCAST: La fuerza

fuerza eléctrica puede superar a la fuerza nuclear y tienden a separarse.

nuclear fuerte

Los neutrones funcionan como un "cemento nuclear" que mantiene unido al núcleo atómico. Los protones atraen tanto a los protones como a los neutrones mediante la fuerza fuerte. Los protones también repelen a otros protones mediante la fuerza eléctrica. Los neutrones, por otra parte, no tienen carga eléctrica y, por tanto, sólo atraen a otros protones y neutrones mediante la fuerza fuerte. En consecuencia, la presencia de neutrones se agrega a la atracción entre nucleones y ayuda a mantener unido al núcleo (Figura 33.14).

+

+

F I G U R A 3 3 . 1 4

Todos los nucleones, tanto los

Sólo los protones se

La presencia de neutrones ayuda a

protones como los neutrones,

repelen entre sí mediante

mantener unido al núcleo porque

se atraen entre sí mediante la

la fuerza eléctrica.

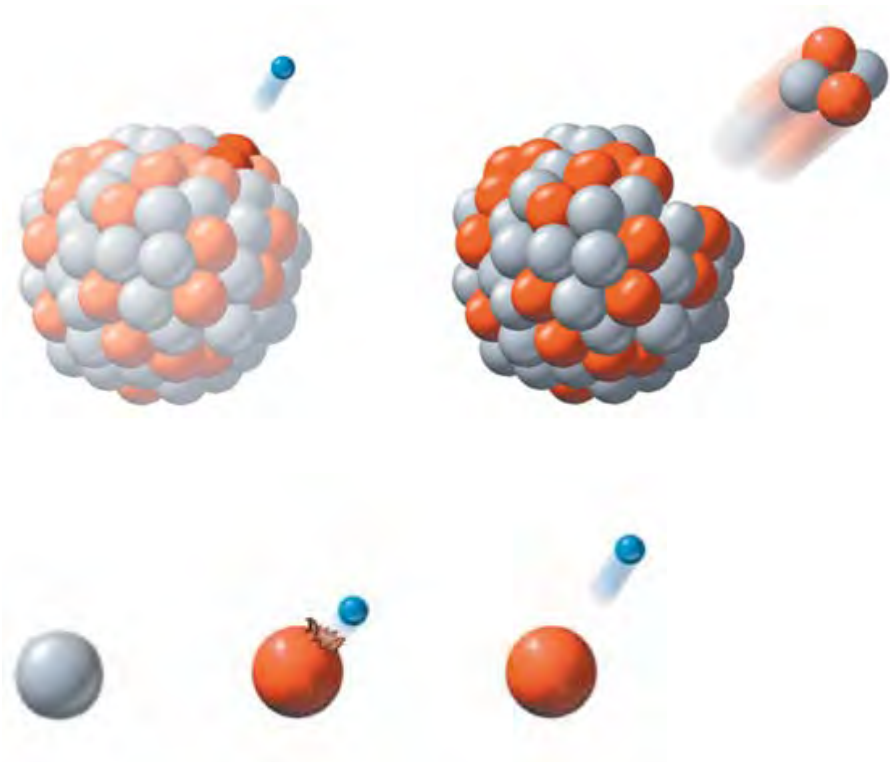
aumenta el efecto de la fuerza fuerte,

fuerza nuclear fuerte.

representada con las flechas de una

sola punta.

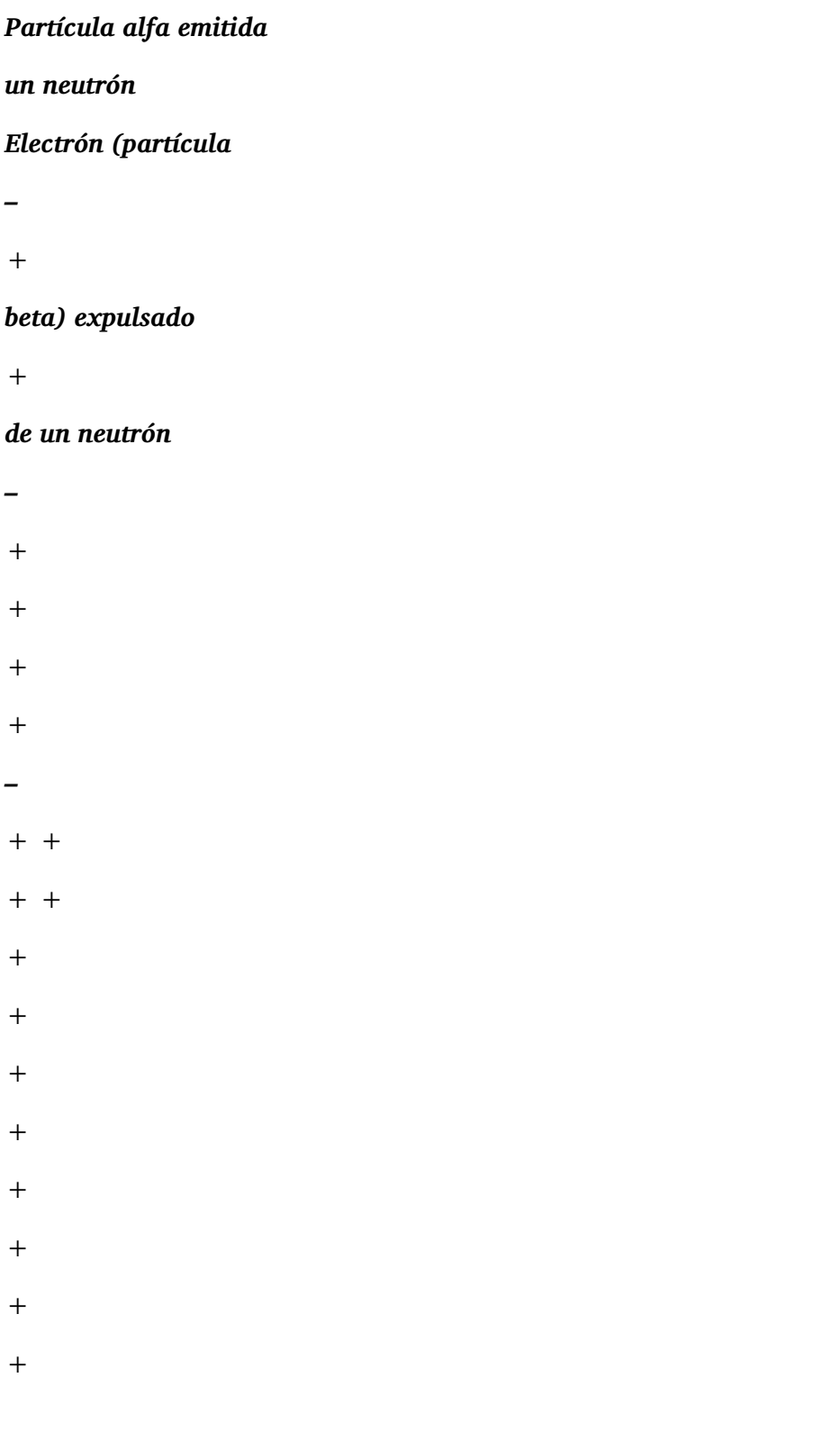
Mientras más protones haya en un núcleo, más neutrones se necesitarán para ayudar a equilibrar las fuerzas eléctricas de repulsión. En el caso de los elementos



ligeros, es suficiente tener más o menos tantos neutrones como protones. El isótopo más común del carbono, el C-12, por ejemplo, tiene igual número de cada uno: seis protones y seis neutrones. Para núcleos grandes se necesitan más neutrones que protones. Puesto que la fuerza fuerte disminuye de manera rápida con la distancia, los nucleones casi deben tocarse para que la fuerza fuerte sea efectiva. Los nucleones en lados opuestos de un gran núcleo atómico no se atraen tanto entre sí. Sin embargo, la fuerza eléctrica no disminuye mucho a través del diámetro de un núcleo grande y, por tanto, comienza a ganar sobre la fuerza fuerte. Para compensar el debilitamiento de la fuerza fuerte a través del diámetro del núcleo, los núcleos grandes tienen más neutrones que protones. El plomo, por ejemplo, tiene casi una y media veces más neutrones que protones.

Por lo que se ve, los neutrones son estabilizadores y los núcleos grandes necesitan muchos de ellos, hasta llegar a un punto después del cual ni siquiera los neutrones pueden mantener unido al núcleo. Es interesante que los neutrones no sean estables cuando están solos. Un neutrón solo es radiactivo y se transforma de manera espontánea en un protón y un electrón (Figura 33.15a). Un neutrón necesita protones alrededor para impedir que esto ocurra. Las partículas alfa emitidas en el decaimiento alfa literalmente son "pedazos" de núcleo, y sólo los núcleos pesados los emiten.3 Las partículas beta y gamma, por otra parte, pueden ser emitidas por núcleos radiactivos tanto pesados como ligeros. En la Figura 33.15b se muestran el decaimiento beta de un solo neutrón y el decaimiento alfa de un núcleo pesado.

Nuevo protón formado de


Partícula alfa emitida
un neutrón
Electrón (partícula
–
+
beta) expulsado
+
de un neutrón
–
+
+
+
+
–
+ +
+ +
+
+
+
+
+
+
+
+
+

+

+

(a)

+

+

+

+

+

+

+

+

+

+

(b)

F I G U R A 3 3 . 1 5

(a) Un neutrón cerca de un protón es estable, pero un neutrón por sí solo es inestable y decae en un protón al emitir un electrón. (b) Desestabilizado por un aumento del número de protones, el núcleo comienza a perder fragmentos, como las partículas alfa.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Qué función tienen los neutrones en el núcleo atómico? ¿Cuál es el destino de un neutrón cuando está solo o alejado de uno o más protones?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

Los neutrones funcionan como cemento nuclear en los núcleos y le añaden estabilidad al núcleo. Pero cuando está solo, un neutrón es radiactivo y se transforma de manera espontánea en un protón y un electrón.

3Una excepción a la regla de que el decaimiento alfa se limita a los

núcleos pesados es el núcleo enormemente radiactivo del berilio-8, con cuatro protones y cuatro neutrones, que se divide en dos partículas alfa —una forma de fisión nuclear—.

33.5 Vida media radiactiva

La tasa de decaimiento radiactivo de un elemento se mide en términos de un tiempo característico, la vida media. Éste es el tiempo que tarda en decaer la mitad de la cantidad original de un isótopo radiactivo. El radio-226, por ejemplo, tiene una vida media de 1,620

años. Esto significa que la mitad de cualquier espécimen VIDEO: Vida media

dado de radio-226 decaerá en otros elementos después de transcurrir 1,620 años.

En los siguientes 1,620 años, la mitad del radio restante decaerá, lo que dejará sólo un cuarto de la cantidad original de radio (después de 20 vidas medias, la cantidad inicial de radio-226 disminuirá por un factor de más o menos 1 millón).

SCREENCAST: Vida media radiactiva

1 kg

12 kg

14 kg

1

F I G U R A 3 3 . 1 6

8 kg

Cada 1,620 años, la cantidad de

radio disminuye a la mitad.

1,620

3,240

4,860

Años

Las vidas medias son notablemente constantes y no las afectan las condiciones externas. Algunos isótopos radiactivos tienen vidas medias que son menos de una mil onésima de segundo, en tanto que otros tienen vidas medias de más de mil mil ones de años. El uranio-238 tiene una vida media de 4.5 mil mil ones de años. Con el La vida media radiactiva de un

tiempo, todo el uranio decae en una serie de pasos hasta plomo. En 4.5 mil mil ones material también es el tiempo en

el que su tasa de decaimiento se

de años, la mitad del uranio presente en la Tierra hoy será plomo.

reduce a la mitad.

No es necesario esperar toda una vida media para medirla. La vida media de un elemento puede calcularse en cualquier momento dado con sólo medir la tasa de decaimiento de una cantidad conocida. Esto se hace de manera fácil con un de -

tector de radiación. En general, cuanto más corta sea la vida media de una sustancia, más rápido se desintegrará, y se detectará más radiactividad por cantidad de material.

Cualquier cantidad que disminuya

P U N T O D E C O N T R O L

a la mitad durante intervalos igua-

Si una muestra de isótopos radiactivos tiene una vida media de 1 día, les de tiempo, se dice que decae

¿cuánto de la muestra original quedará al final del segundo día?

exponencialmente. Cualquier

¿Del tercer día?

cantidad que aumente al doble

durante intervalos iguales de

tiempo, se dice que crece expo-

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

nencialmente. ¡Asegúrate de leer

Un cuarto al final del segundo día, un octavo al final del tercer día.

sobre el crecimiento exponencial

en el Apéndice E!

33.6 Detectores de radiación

Los movimientos térmicos ordinarios de los átomos que chocan entre sí en un gas o en un líquido no son lo suficientemente energéticos como para desprender electrones y los átomos permanecen neutrales. Pero cuando una partícula energética, como una partícula alfa o una beta, se dispara a través de la materia, los electrones son desprendidos uno tras otro de los átomos en la trayectoria de la partícula. El resultado es un rastro de electrones liberados e iones con carga positiva. Este proceso de ionización es el que causa los

efectos dañinos de la radiación de alta energía en las células vivas. La ionización también hace relativamente sencil o rastrear las trayectorias de las partículas de alta energía. A continuación se hará una breve presentación de cinco dispositivos para la detección de radiación.

F I G U R A 3 3 . 1 7

Detectores de radiación. (a) Un contador Geiger detecta la radiación entrante mediante un corto pulso de corriente que es disparado cuando la radiación ioniza un gas en el interior del tubo. (b) Un contador de centelleo indica la radiación entrante mediante los destellos de luz producidos cuando las partículas cargadas o los rayos gamma pasan por el contador.

(a)

(b)

1. Un contador Geiger consiste en un alambre central que está en un cilindro de metal hueco lleno de gas a baja presión. A través del cilindro y el alambre se aplica un voltaje eléctrico, de modo que el alambre es más positivo que el cilindro. Si la radiación entra en el tubo e ioniza un átomo del gas, el electrón liberado es atraído hacia el alambre central con carga positiva. A medida que este electrón acelera hacia el alambre, choca con otros átomos y desprende más electrones, los cuales, a su vez, producen más electrones, y así sucesivamente, lo que resulta en una cascada de electrones que se mueven hacia el alambre. Esto produce un corto pulso de corriente eléctrica, que activa un dispositivo de conteo conectado al tubo. Cuando se amplifica, este pulso de corriente produce el Rastros

Muestra

de vapor

familiar chasquido que se asocia con los detectores de radiación.

radiactiva

2. Una cámara de niebla muestra una trayectoria visible de la radiación ionizante en forma de rastros de neblina. Consiste en una cámara cilíndrica cerrada en el extremo superior con una ventana de vidrio, y en el extremo inferior con un pistón móvil. El vapor de agua o el vapor de alcohol en el interior de la cámara pueden saturarse al ajustar el pistón. La fuente de radiación puede estar afuera de la cámara o en su interior, como se muestra en la Figura 33.18. Cuando una partícula cargada pasa por la cámara, se producen iones a lo largo de su trayectoria. Si entonces el Pistón

aire saturado en la cámara se enfría de manera súbita por el movimiento del pistón, pequeñas gotas de humedad se condensan en torno a estos iones y forman rastros de vapor, que muestran las trayectorias de la radiación. Éstas son las versiones F I G U R A 3 3 . 1 8

atómicas de los rastros de cristal de hielo que dejan en el cielo los aviones jet.

Una cámara de niebla. Las partículas

La cámara de niebla continua es incluso más simple. Contiene un vapor super-cargadas que se mueven a través del

saturado estable porque descansa sobre una placa de hielo seco, con un gradiente vapor supersaturado dejan rastros.

de temperatura que va desde casi la temperatura ambiente en la parte superior Cuando la cámara está en un intenso

hasta una temperatura muy baja en la parte inferior. Los rastros de niebla que se campo eléctrico o magnético, el

doblamiento de las trayectorias

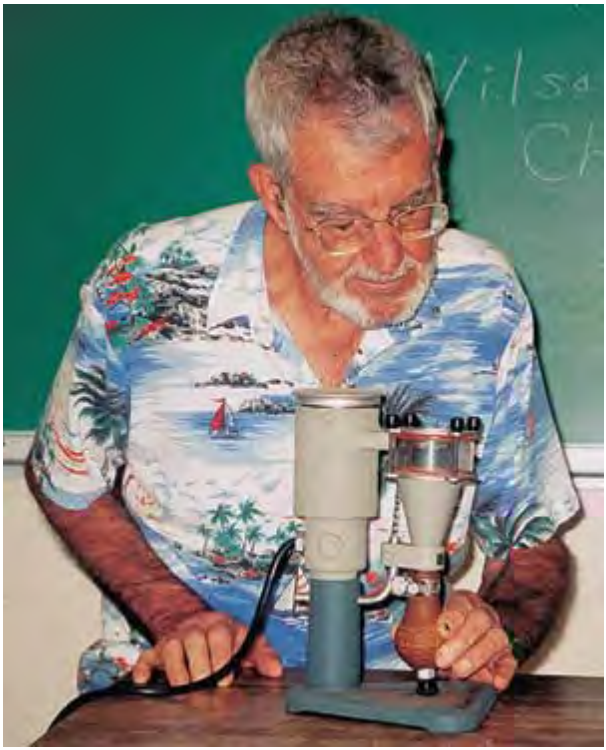
forman son iluminados con una lámpara y pueden verse o fotografiarse a través de proporciona información de la carga,

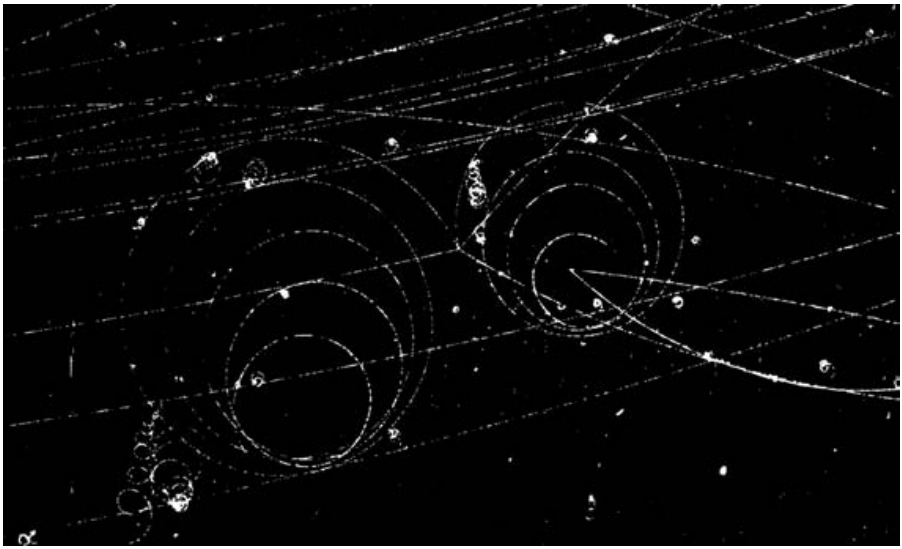
la ventana superior. La cámara puede colocarse en un intenso campo eléctrico o la masa y la cantidad de movimiento

magnético, que doblará las trayectorias en una forma que ofrece información de la de las partículas.

carga, la masa y la cantidad de movimiento de las partículas de radiación.

Las cámaras de niebla, que fueron herramientas muy importantes en las primeras investigaciones de los rayos cósmicos, se utilizan en la actualidad





principalmente con propósitos didácticos. Quizás tu instructor te muestre alguna, como lo hace Walter Steiger en la Figura 33.19.4

3. Los rastros de las partículas que se ven en una cámara de burbujas son diminutas burbujas de gas en hidrógeno líquido (Figura 33.20). El hidrógeno líquido se calienta bajo presión en una cámara de vidrio y acero inoxidable hasta un punto cercano a la ebullición. Si la presión en la cámara se libera en forma súbita al momento en que entra una partícula productora de iones, un pequeño rastro de burbujas queda a lo largo de la trayectoria de la partícula. Después, todo el líquido hierve pero, en las pocas milésimas de segundo antes de que esto ocurra, se toman fotografías del rastro con corta vida de la partícula. Al igual que con la cámara de niebla, un campo magnético en la cámara de burbujas revela información sobre la carga y la masa relativa de las partículas que se estudian. Las cámaras de burbujas se usaron de manera generalizada en la investigación en décadas pasadas, pero en la actualidad hay un mayor interés por las cámaras de chispas.

F I G U R A 3 3 . 1 9

Walter Steiger examina rastros de

vapor en una pequeña cámara

de niebla.

F I G U R A 3 3 . 2 0

Rastros de partículas elementales

en una cámara de burbujas. (El ojo

experimentado distingue que dos

partículas se destruyeron en el punto

desde el cual emanan las espirales, y

en la colisión se crearon otras cuatro.)

4. Una cámara de chispas es un dispositivo de conteo que consiste en un arreglo de placas paralelas con espacios estrechos entre sí. Las

placas se aterrizan de forma alternada y las placas que se ubican en medio de las aterrizadas se mantienen a un voltaje alto (más o menos 10 kV). Los iones se producen en el gas entre las placas cuando las partículas cargadas pasan por la cámara. La descarga a lo largo de la trayectoria iónica produce una chispa visible entre pares de placas.

Un rastro de muchas chispas revela la trayectoria de la partícula. Un diseño diferente, llamado cámara de "streamer" , consiste sólo en dos placas ampliamente espaciadas, entre las cuales una descarga eléctrica, o "streamer", sigue muy de cerca la trayectoria de la partícula cargada incidente. La principal ventaja de las cámaras de chispa y de streamer sobre la cámara de burbujas es que pueden monitorizarse más eventos en un tiempo determinado.

5. Un contador de centel eo aprovecha que ciertas sustancias se excitan con facilidad y emiten luz cuando las partículas cargadas o rayos gamma pasan a través de el as. Pequeños destel os de luz, o centel eos, se convierten en señales eléctricas mediante tubos fotomultiplicadores especiales. Un contador de centel eos es mucho más sensible a los rayos gamma que un contador Geiger y, además, puede F I G U R A 33 . 21

medir la energía de las partículas cargadas o rayos gamma absorbidos en el detec- La Gran Cámara de Burbujas Europea tor. El detector de radiación que Roger Rassool muestra en una de las fotografías (BEBC, por sus siglas en inglés) en el al inicio del capítulo es un escintilador. Es interesante que el agua ordinaria, CERN, cerca de Ginebra, es típica de

cuando está altamente purificada, pueda funcionar como un escintilador.

las grandes cámaras de burbujas que

se usaron en la década de 1970 para

4Walter Steiger, el "padre de la astronomía" en Hawái y mi amigo personal cercano, murió en un accidente de tránsito en 2009. El edificio de ciencia y tecnología de la University of Hawaii en Hilo lleva su nombre estudiar las partículas producidas por en su honor.

aceleradores de alta energía.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Cuál produce una tasa de conteo más alta en un detector de radiación: un material radiactivo que tiene vida media corta o un material radiactivo que tiene vida media larga?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

El material con la vida media más corta es más activo y mostrará una mayor tasa de conteo en un detector de radiación.

33.7 Transmutación de elementos

Cuando un núcleo radiactivo emite una partícula alfa o beta, hay un cambio en su número atómico: se forma un elemento diferente. El cambio de un elemento químico en otro se llama transmutación. La transmutación ocurre en eventos naturales y también se inicia de manera artificial en el laboratorio.

SCREENCAST: Transmutación

Transmutación natural

Piensa en el uranio-238, cuyo núcleo contiene 92 protones y 146 neutrones. Cuando se expulsa una partícula alfa, el núcleo pierde dos protones y dos neutrones.

Puesto que un elemento se define por el número de protones en su núcleo, los 90

protones y 144 neutrones que quedan ya no se identifican como uranio. Lo que se tiene es el núcleo de un elemento diferente: torio. Esta transmutación puede escribirse como una ecuación nuclear:

92 +

90 +

2+

+

146

144

2

238

234

4

92U

90 Th + 2 He

Se ve que 238U transmuta a los dos elementos escritos a la derecha de la flecha.

92

Cuando esta transmutación ocurre, se libera energía, parte en forma de energía cinética de la partícula alfa 4He, parte en la energía cinética del núcleo de torio y 2

parte en forma de radiación gamma. En ésta, y en todas las ecuaciones similares, los números de masa en la parte superior se equilibran (238 234 4) y los números atómicos en la parte inferior también se equilibran (92 90 2).

El torio-234, el producto de esta reacción, también es radiactivo. Cuando decae, emite una partícula beta.5 Debido a que una partícula beta es un electrón, el número atómico del núcleo resultante aumenta en 1. De este modo, después de la emisión beta del torio con 90 protones, el elemento resultante tiene 91 protones.

5La emisión beta siempre se acompaña de la emisión de un neutrino (en realidad, un antineutrino), una partícula neutra con masa casi cero que viaja aproximadamente a la rapidez de la luz. El neutrino ("pequeño neutro") fue postulado por Wolfgang Pauli en 1930 y detectado en 1956. Los neutrinos son difíciles de detectar porque interactúan de manera muy débil con la materia. Mientras que un pedazo de plomo sólido de unos centímetros de grosor detendrá la mayoría de los rayos gamma provenientes de una fuente de radio, se necesitaría un pedazo de plomo de unos 8 años-luz de grosor para detener a la mayoría de los neutrinos producidos en los decaimientos nucleares típicos. Miles de neutrinos vuelan a través tuyo cada segundo de cada día porque el Universo está lleno de ellos. Sólo ocasionalmente, una o dos veces al año más o menos, un neutrino interactúa con la materia de tu cuerpo.

Al momento de escribir este capítulo, se desconoce la masa exacta de los neutrinos, pero se ha establecido que no es más de alrededor de un millonésimo de la masa de un electrón. Sin embargo, los neutrinos son tan numerosos que podrían constituir la mayor parte de la masa del Universo. Los neutrinos pueden ser el

"pegamento" que mantiene unido al Universo.

Ya no es torio, sino el elemento protactinio. Aunque en este proceso el número atómico aumentó por 1, el número de masa (protones + neutrones) permanece igual.

La ecuación nuclear es:

90 +

91 +

144

+

-

143

234

234

0

90 Th

91 Pa +

e

–1

Un electrón se escribe como 0 . El superíndice 0 indica que la masa del elec-1 e

-

trón es insignificante en relación con la de los protones y neutrones. El subíndice 1 es la carga eléctrica del electrón. (Esta reacción y todas las emisiones beta están acompañadas de antineutrinos, que no se muestran en la figura.)

De este modo, se observa que, cuando un elemento expulsa una partícula alfa de su núcleo, el número de masa del átomo resultante disminuye en 4 y su número atómico disminuye en 2. El átomo resultante es un elemento que está dos espacios Una tonelada de granito ordi-atrás en la tabla periódica de los elementos. Cuando un elemento expulsa una par-nario contiene alrededor de

tícula beta de su núcleo, la masa del átomo prácticamente no es afectada, lo cual 9 gramos de uranio y 20 gramos

significa que no hay un cambio en el número de masa, pero su número atómico de torio. Una tonelada de basalto

contiene 3.5 gramos de uranio y

aumenta en 1. El átomo resultante pertenece a un elemento que está un lugar ade-7.7 gramos de torio.

lante en la tabla periódica. La emisión gamma no resulta en un cambio ni en el número de masa ni en el número atómico. Por ello, se ve que los elementos radiactivos pueden decaer hacia atrás o hacia adelante en la tabla periódica.6

En la Figura 33.22 se muestra la sucesión de decaimientos radiactivos de 238U a 206Pb, 92

82

un isótopo del plomo. Cada flecha azul muestra un decaimiento alfa y cada flecha roja muestra un decaimiento beta. Observa que algunos de los núcleos de la serie pueden decaer de ambas maneras. Ésta es una de varias series radiactivas similares que ocu -

rren en la naturaleza.

238

U

234

Th

Pa

U

230

Th

226

Ra

tómica 222

Rn

asa aM 218

Po

At

214

Pb

Bi

Po

210 Tl

Pb

Bi

Po

206 Tl

Pb

81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92

Número atómico

F I G U R A 3 3 . 2 2

U-238 decae a Pb-206 a través de una serie de decaimientos alfa y beta.

6En ocasiones un núcleo emite un positrón, que es la "antipartícula" de un electrón. En este caso, un protón se convierte en un neutrón, y el número atómico disminuye.

630

PA R T E S I E T E

F ÍSI C A S ATÓ M I C A Y N U CL E A R

P U N T O D E C O N T R O L

1. Completa las siguientes reacciones nucleares:

a. 226 Ra ?

→ ?

e

88

? 1 0

21

b. 209 Po 205

→

Pb

?

84

82

1 ??

2. ¿En qué se convierte finalmente todo el uranio que experimenta decaimiento radiactivo?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. a. 226 Ra → 226 Ac

e

88

89

1 0

21

b. 209 Po → 205 Pb

H e

84

82

1 42

2. A final de cuentas, todo el uranio se convierte en plomo. En el camino para convertirse en plomo, existirá como una serie de elementos, como se indica en la Figura 33.22.

Transmutación artificial

Ernest Rutherford, en 1919, fue el primero de muchos investigadores en lograr transmutar de manera deliberada un elemento químico. Bombardeó gas nitrógeno con partículas alfa provenientes de un pedazo de material radiactivo. El impacto de una partícula alfa sobre un núcleo de nitrógeno puede transmutar el nitrógeno en oxígeno:

7 +

8 +

2 +

+

+ +

2

7

9

4He

14

17

1

2

+ 7N

8O + 1H

Rutherford usó una cámara de niebla para registrar este evento. A partir de un cuarto de millón de rastros de cámara de niebla fotografiados sobre una película, mostró siete ejemplos de transmutación atómica. El análisis de los rastros que se doblaron mediante un intenso campo magnético externo demostró que, en ocasiones, cuando una partícula alfa choca con un átomo de nitrógeno, un protón rebota y el átomo pesado retrocede una corta distancia. La partícula alfa desaparecía. La partícula alfa era absorbida en el proceso, lo que transformaba el nitrógeno en oxígeno.

Desde el anuncio de Rutherford en 1919, los investigadores han realizado muchas otras reacciones nucleares, primero con proyectiles de bombardeo naturales provenientes de fuentes radiactivas, y después con proyectiles aún más energéticos: protones y otras partículas arrojadas por enormes aceleradores de partículas. La transmutación artificial es lo que produce los hasta ahora desconocidos elementos sintéticos con números atómicos del 93 al 118. Todos estos elementos producidos artificialmente tienen vidas medias cortas. Cualquiera que pudiera haber existido de manera natural cuando la Tierra se formó decayó desde hace mucho tiempo.

33.8 Datación radiométrica

La atmósfera de la Tierra es bombardeada de manera continua por rayos cósmicos, y este bombardeo hace que transmuten muchos átomos en la atmósfera superior. Estas transmutaciones resultan en muchos protones y neutrones que se "rocían" al ambiente.

La mayoría de los protones se detiene cuando chocan con los átomos de la atmósfera superior y desprenden electrones de dichos átomos para convertirse en átomos de hidrógeno. Sin embargo, los neutrones siguen su marcha durante distancias más largas porque no tienen carga eléctrica y, en consecuencia, no interactúan eléctricamente con la materia. Con el tiempo, muchos de el os chocan con los núcleos en la atmósfera

inferior más densa. Un núcleo de nitrógeno que captura un neutrón, por ejemplo, puede emitir un protón y convertirse en el núcleo de un isótopo de carbono: 7 +

6 +

+

+

+

7

8

1 n

14

14

1

0

+ 7N

6C + 1H

Este isótopo carbono-14, que constituye aproximadamente una bil onésima parte del carbono en la atmósfera, tiene ocho neutrones y es radiactivo. (El isótopo más común, el carbono-12, tiene seis neutrones y no es radiactivo.) Puesto que tanto el carbono-12

como el carbono-14 son formas de carbono, tienen las mismas propiedades químicas.

Ambos isótopos pueden reaccionar químicamente con oxígeno para formar dióxido de carbono, que absorben las plantas. Esto significa que todas las plantas contienen una pequeña cantidad de carbono-14 radiactivo. Todos los animales comen plantas (u otros animales que comen plantas) y, por tanto, tienen en el os un poco de carbono-14. En resumen: todas las cosas vivas sobre la Tierra contienen algo de carbono-14.

El carbono-14 es un emisor beta y decae de vuelta a nitrógeno mediante la siguiente reacción:

6 +

7 +

+

-

8

7

146C

14

0

7N +

e

–1

Puesto que las plantas siguen absorbiendo dióxido de carbono en tanto estén vivas, cualquier pérdida de carbono-14 por decaimiento se rel ena de inmediato con carbono-14 fresco proveniente de la atmósfera. De esta forma, se alcanza un equilibrio radiactivo donde existe una razón constante de alrededor de un átomo de carbono-14

por cada bil ón de átomos de carbono-12. Cuando una planta muere, el reabastecimiento de carbono-14 se detiene. Entonces el porcentaje de carbono-14 disminuye a una tasa constante determinada por su vida media.7 En consecuencia, cuanto más tiempo lleve muerta una planta u otro organismo, menor carbono-14 contendrá en comparación con la cantidad constante de carbono-12.

La vida media del carbono-14 es de aproximadamente 5,730 años. Esto significa que la mitad de los átomos de carbono-14 que ahora están presentes en una planta o animal que muera hoy decaerá en los próximos 5,730 años. La mitad de los átomos restantes de carbono-14 decaerán en los siguientes 5,730 años, y así sucesivamente.

Hace 22,920 años

Hace 17,190 años

Hace 11,460 años

Hace 5,730 años

Presente

F I G U R A 3 3 . 2 3

La cantidad de carbono-14 radiactivo del esqueleto disminuye a la mitad cada 5,730 años, con el resultado de que hoy el esqueleto contiene sólo una fracción del carbono-14 que tenía originalmente. Las flechas rojas simbolizan las cantidades relativas de carbono-14.

7Una muestra de 1 g de carbono contemporáneo contiene más o menos 5 1022 átomos, de los cuales 6.5 1010 son átomos de C-14, y

tienen una tasa de desintegración beta de aproximadamente 13.5 decaimientos por minuto.

632

PA R T E S I E T E

F ÍSI C A S ATÓ M I C A Y N U CL E A R

IRRADIACIÓN DE ALIMENTOS

Cada semana en Estados Unidos, unas 100 personas, la radiactivo

porque los rayos gamma carecen de la energía nece-mayoría de ellas niños o ancianos, mueren por enfer-

saria para desprender neutrones de los núcleos atómicos.

medades que contraen de los alimentos. Las personas

Sin embargo, la irradiación sí deja trazas de compuestos

que padecen cada semana enfermedades transmitidas por los

rotos, idénticos a los que resultan de la pirólisis de los alimentos

alimentos representan millones, de acuerdo con los Centers

a la parrilla que ya ingieres. Comparado con el enlatado y el

for Disease Control and Prevention en Atlanta, Georgia.

almacenamiento en frío, la irradiación tiene pocos efectos sobre

Pero los astronautas nunca. ¿Por qué? Porque la diarrea en

la nutrición y el sabor. Estuvo presente durante la mayor parte

órbita jamás sucede, y los alimentos ingeridos en las misio-

del siglo XX y se ha puesto a prueba durante más de 50 años,

nes espaciales se irradian con rayos gamma de alta energía

sin evidencia de peligro para los consumidores. La irradiación

proveniente de una fuente de cobalto radiactivo (Co-60).

de alimentos es respaldada por todas las principales sociedades

Los astronautas, así como los pacientes en muchos hospitales

científicas, la Organización Mundial de la Salud de las Naciones

y asilos, no tienen que luchar contra la salmonela, E. Coli,

Unidas, la FDA de Estados Unidos y la American Medical As-

microbios o parásitos en los alimentos irradiados con Co-60.

sociation. La irradiación es el método de elección en 37 países,

Entonces, ¿por qué no hay más comida irradiada en el mer-

como Bélgica, Francia y los Países Bajos. Pero su uso en Estados

cado? La respuesta es el temor público a la palabra radiación.

Unidos en la actualidad es bajo, pues la controversia continúa.

La irradiación de alimentos mata insectos en los gra-

Esta controversia es otro ejemplo de la evaluación y la ad-

nos, harina, frutas y verduras. Pequeñas dosis evitan que las

ministración de riesgos. ¿Acaso los riesgos de lesión o muerte

papas, las cebollas y los ajos almacenados se echen a perder y

por los alimentos irradiados no deben ser juzgados de un

aumenta de manera significativa la vida en anaqueles de los

modo racional y ponderados contra los beneficios que pro-

frutos rojos, como las fresas. Dosis más altas matan microbios,

porcionaría? ¿Acaso la decisión no debe basarse en el número

insectos y parásitos en las especias, el puerco y el pollo. La

de personas que pueden morir por alimentos irradiados frente

irradiación puede penetrar a través de latas y paquetes sella-

a quienes de hecho mueren porque el alimento no se irradió?

dos. Lo que la irradiación no hace es dejar radiactivo el aliTal vez lo que se necesite sea un cambio de nombre: elimi-

mento irradiado. Ningún material radiactivo toca al alimento.

nar la palabra radiación, como se hizo con la palabra nuclear Los rayos gamma atraviesan el alimento como la luz pasa a

cuando el procedimiento médico al que se oponían y que una

través del vidrio, y destruye la mayor parte de las bacterias que

vez se conoció como NMRI (resonancia magnética nuclear) re-

pueden provocar enfermedades. Ningún alimento se vuelve

cibió el nombre más aceptable de MRI (resonancia magnética).

Con este conocimiento, los científicos pueden calcular la edad de los artefactos que contienen carbono, como herramientas de madera o esqueletos, al medir su nivel actual de radiactividad. Este proceso, conocido como datación con carbono, SCREENCAST: Datación con carbono

permite sondear hasta 50,000 años en el pasado. Después de ese tiempo, hay poco carbono-14 restante que permita análisis exactos.

La datación con carbono-14 sería un método de datación relativamente sencil o y exacto si la cantidad de carbono radiactivo en la atmósfera hubiera sido constante en el transcurso de las eras. Pero no ha sido así. Las fluctuaciones en el campo magnético del Sol, así como los cambios en la intensidad del campo magnético de la Tierra afectan las intensidades de los rayos cósmicos en la atmósfera de la Tierra, lo cual a su vez produce fluctuaciones en la producción de C-14. Además, los cambios de clima VIDEO: Datación con carbono

de la Tierra afectan la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera. Los océanos son grandes depósitos de dióxido de carbono. Cuando los océanos son fríos, liberan menos dióxido de carbono en la atmósfera que cuando están calientes.

P U N T O D E C O N T R O L

Supón que un arqueólogo extrae un gramo de carbono de una antigua

hacha de mano y descubre que tiene un cuarto de la radiactividad que tiene un gramo del carbono extraído de una rama de árbol recién cortada.

¿Aproximadamente cuán antigua es el hacha?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Si supones que la razón de C-14/C-12 era la misma cuando se fabricó el hacha, el mango del hacha tiene una antigüedad de dos vidas medias de C-14, o unos 11,500 años.

La datación de cosas antiguas, pero no la de seres vivos, se logra con minerales radiactivos, como el uranio. Los isótopos U-238 y U-235 que ocurren de manera natural decaen con mucha lentitud y al final se convierten en isótopos de plomo, pero no el isótopo de plomo común Pb-208. Por ejemplo, el U-238 decae en varias etapas hasta finalmente convertirse en Pb-206, mientras que el U-235 al final se convierte en el isótopo Pb-207. Los isótopos de plomo 206 y 207 que ahora existen, en algún momento fueron uranio. Cuanto más antigua sea la roca que tiene uranio, mayor es el porcentaje de estos isótopos restantes. A partir de las vidas medias de los isótopos de uranio, y del porcentaje de isótopos de plomo en la roca que tiene uranio, es posible calcular la fecha cuando se formó la roca.

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)

Rayo X. *Radiación electromagnética con frecuencias más altas que el ultravioleta; emitidas por transiciones electrónicas a los estados energéticos más bajos en los átomos.*

Nucleón. *Protón o neutrón nuclear; nombre colectivo para cualquiera de ellos o ambos.*

Quarks. *Las partículas elementales constituyentes o bloques constructores de la materia nuclear.*

Radiactividad. *Emisión espontánea de partículas energéticas por un núcleo atómico.*

Fuerza fuerte. *La fuerza que atrae a los nucleones entre sí dentro del núcleo atómico; una fuerza que es muy intensa a distancias cercanas y se debilita mucho con la distancia.*

Rayo alfa. *Chorro de partículas alfa (núcleos de helio) expulsados por determinados elementos radiactivos.*

Rayo beta. *Chorro de electrones (o positrones) emitidos*

Vida media. Tiempo necesario para que decaiga la mitad de

durante el decaimiento radiactivo de ciertos núcleos.

los átomos en una muestra de un isótopo radiactivo.

Rayo gamma. Radiación electromagnética de frecuencia alta

Transmutación. Conversión de un núcleo atómico de

emitida por los núcleos de los átomos radiactivos.

un elemento en un núcleo atómico de otro elemento

rad. Acrónimo en inglés de "dosis de radiación absorbida" que a través de una pérdida o ganancia en el número de

denota una unidad de energía absorbida. Un rad es igual

protones.

a 0.01 J de energía absorbida por kilogramo de tejido.

Datación con carbono. El proceso de determinar el tiempo

rem. Acrónimo en inglés de "roentgen equivalente en huma-

transcurrido desde la muerte al medir la radiactividad

no" que denota una unidad usada para medir el efecto de

del carbono de una muestra debida al carbono-14 que

la radiación ionizante en los seres humanos.

contiene.

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N) 33.1 Los rayos X y la radiactividad

33.4 El núcleo atómico y la fuerza fuerte

1. ¿Qué descubrió Roentgen acerca de un haz de rayos ca-

11. Menciona los dos nucleones diferentes.

dicos que golpeaban una superficie de vidrio?

12. ¿Por qué la fuerza eléctrica de repulsión de los protones en el

2. ¿Qué tipo de rayos son los rayos X?

núcleo atómico no hace que los protones salgan disparados?

3. ¿Qué descubrió Becquerel acerca del uranio?

13. ¿Por qué un núcleo más grande por lo general es menos

4. ¿Cuáles dos elementos descubrieron Pierre y Marie Curie?

estable que un núcleo más pequeño?

14. ¿Cuál es la función de los neutrones en el núcleo atómico?

33.2 Rayos alfa, beta y gamma

15. ¿Cuál contiene el mayor porcentaje de neutrones: los

5. ¿Por qué los rayos gamma no se desvían en un campo

núcleos grandes o los núcleos pequeños?

magnético?

6. ¿Cuál tiene frecuencia más alta: los rayos X o los rayos

33.5 Vida media radiactiva

gamma?

16. En general, ¿cómo se compara la tasa de decaimiento de

un material con vida media larga, con la tasa de decai-

33.3 Radiación ambiental

miento de un material con vida media corta?

7. Distingue entre un rad y un rem.

17. ¿Cuál es la vida media del Ra-226?

8. ¿Los seres humanos reciben más radiación de fuentes de

radiación artificiales o naturales?

33.6 Detectores de radiación

9. ¿El cuerpo humano es radiactivo? Explica.

18. ¿Qué tipo de rastro queda cuando una partícula energéti-

10. ¿Qué es un trazador radiactivo?

ca se dispara a través de la materia?

634

PA R T E S I E T E

F ÍSI C A S ATÓ M I C A Y N U CL E A R

19. ¿Cuál tipo de detector percibe la radiación mediante la

25. ¿Qué cambio en el número atómico ocurre cuando un

ionización de gas en un tubo?

núcleo emite una partícula alfa? ¿Una partícula beta? ¿Un

20. ¿Cuál tipo de detector percibe los destellos de luz produ-

rayo gamma?

cidos por partículas cargadas o rayos gamma?

26. ¿Cuál es el destino en el largo plazo de todo el uranio que

existe en el mundo?

33.7 Transmutación de elementos

27. ¿Cuándo ocurrió la primera transmutación intencional

21. ¿Qué es una transmutación?

exitosa de un elemento, y quién la llevó a cabo?

22. Cuando el torio (número atómico 90) decae mediante

emisión de una partícula alfa, ¿cuál es el número atómico

33.8 Datación radiométrica

del núcleo resultante?

28. ¿Qué ocurre cuando un núcleo de nitrógeno captura un

23. Cuando el torio decae mediante la emisión de una partícu-

neutrón adicional?

la beta, ¿cuál es el número atómico del núcleo resultante?

29. ¿Cuál es más predominante en los alimentos que comes:

24. ¿Cuál es el cambio en el número de masa atómica para

el carbono-12 o el carbono-14?

cada una de las reacciones en las dos preguntas anteriores?

30. ¿Por qué el plomo se encuentra en todos los depósitos de uranio?

P I E N S A Y R E A L I Z A (A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 31. *Escribe una carta a uno de tus parientes favoritos que*

la datación de objetos antiguos. También explica cómo la

le ayude a disipar cualquier noción que pueda tener res-

radiactividad es una fuente principal del calor natural

pecto de que la radiactividad es algo nuevo en el mundo.

en el interior de la Tierra, y cita su importancia en los

Haz un breve análisis de la función de la radiactividad en

manantiales térmicos y volcanes.

P I E N S A Y R E S U E L V E (A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 32. *Si una muestra de un isótopo radiactivo tiene una vida*

herramienta diagnóstica con su escáner PET. La vida

media de 1 año, ¿cuánto de la muestra original quedará al

media del F-18 es de 1.8 horas. ¿Cuánto F-18 queda a las

final del segundo año? ¿Al final del tercer año? ¿Al final

3:00 pm? ¿A medianoche? ¿El hospital debe planear pro-

del cuarto año?

ducir más F-18 la mañana siguiente?

33. Una muestra de un radioisótopo particular se coloca

36. Supón que la intensidad de la radiación de carbono-14

cerca de un contador Geiger, y se observa que registra

en un antiguo pedazo de madera se registra en 6% de lo

160 conteos por minuto. Ocho horas después, el detector

que sería en uno recién cortado de madera. Demuestra que

cuenta a una tasa de 10 conteos por minuto. ¿Cuál es la

este artefacto tiene 23,000 años de antigüedad.

vida media del material?

37. Supón que quieres saber cuánta gasolina hay en un tan-

34. El isótopo cesio-137, que tiene una vida media de 30 años,

que de almacenamiento subterráneo. Viertes 1 galón de

es un producto de las plantas de energía nuclear. Demues-

gasolina que contiene cierto material radiactivo con una

tra que transcurrirán 120 años para que este isótopo decai-

vida media larga que produce 5,000 conteos por minuto.

ga a cerca de un dieciseisavo de su cantidad original.

Al día siguiente, retiras un galón del tanque subterrá-

35. A las 6:00 am, un hospital usa su ciclotrón para producir

neo y mides su radiactividad en 10 conteos por minuto.

1 miligramo del isótopo flúor-18 para utilizarlo como

¿Cuánta gasolina hay en el tanque?

P I E N S A Y C L A S I F I C A (A N Á L I S I S)

38. Clasifica estos tres tipos de radiación por su capacidad

b. neutrones en el núcleo.

para penetrar esta página de tu libro, de mayor penetra-

c. electrones que suelen rodear al núcleo.

ción a menor:

40. Considera las siguientes reacciones: A. Uranio-238 emite

a. Partícula alfa.

una partícula alfa; B. Plutonio-239 emite una partícula

b. Partícula beta.

alfa; C. Torio-239 emite una partícula beta.

c. Rayo gamma.

a. Clasifica el núcleo resultante por su número atómico,

39. Considera estos tres núcleos: A. Th-233; B. U-235;

del más alto al más bajo.

C. U-238. De mayor a menor, clasifícalos por el número de

b. Clasifica el núcleo resultante por el número de neutro-

a. protones en el núcleo.

nes, de más a menos.

C C

A H

PÍ A

T P

U T E

LO R 3

33 3

R R

E E

V V

I SI E W

Ó N

635

P I E N S A Y E X P L I C A (S Í N T E S I S)

41. En el siglo XIX, el famoso físico lord Kelvin estimó que

61. ¿Por qué diferentes isótopos del mismo elemento tienen

la edad de la Tierra era mucho menor de la que se calcula

las mismas propiedades químicas?

en la actualidad. ¿Qué información, que Kelvin no tuvo,

62. La radiación proveniente de una fuente puntual obedece

le habría impedido cometer este error en la estimación?

la ley del inverso al cuadrado. Si un contador Geiger a

42. ¿A cuál de los siguientes son más similares los rayos X:

1 m de una muestra pequeña registra 360 conteos por

rayos alfa, beta o gamma?

minuto, ¿cuál será su tasa de conteo a 2 m de la fuente?

43. La radiación gamma es fundamentalmente diferente a las

¿Cuál será a 3 m de la fuente?

radiaciones alfa y beta. ¿Cuál es esta diferencia básica?

63. ¿Por qué las partículas cargadas que vuelan a través de

44. ¿Por qué una muestra de material radiactivo siempre está

una cámara de burbujas viajan en trayectorias espirales en

un poco más caliente que sus alrededores?

lugar de hacerlo en trayectorias circulares o elípticas que

45. Algunas personas dicen que todas las cosas son posibles.

idealmente pueden seguir?

¿Es posible que un núcleo de hidrógeno común emita una

64. ¿Cuáles dos cantidades siempre se conservan en todas las

partícula alfa? Defiende tu respuesta.

ecuaciones nucleares?

46. ¿Por qué los rayos alfa y beta se desvían en direcciones

65. Si un átomo tiene 100 electrones, 157 neutrones y 100

opuestas en un campo magnético? ¿Por qué los rayos

protones, ¿cuál es su masa atómica aproximada? ¿Cuál es

gamma no se desvían?

el nombre de este elemento?

47. La partícula alfa tiene el doble de carga eléctrica que la

66. Cuando un núcleo de 226Ra decae mediante la emisión de

88

partícula beta pero, para la misma energía cinética, se

una partícula alfa, ¿cuál es el número atómico del núcleo

desvía menos que la beta en un campo magnético. ¿Por

resultante?

qué esto es así?

67. Cuando un núcleo de 218Po emite una partícula beta,

84

48. ¿Cómo se comparan las trayectorias de los rayos alfa, beta

se transforma en el núcleo de un elemento diferente.

y gamma en un campo eléctrico?

¿Cuáles son el número atómico y el número de masa ató-

49. ¿Cuál tipo de radiación (alfa, beta o gamma) produce un

mica de este elemento "hijo"?

mayor cambio en el número de masa cuando es emitida

68. Cuando un núcleo de 218Po emite una partícula alfa,

84

por un núcleo atómico? ¿Cuál produce el mayor cambio

¿cuáles son el número atómico y el número de masa ató-

en número atómico?

mica del elemento resultante?

50. ¿Cuál tipo de radiación (alfa, beta o gamma) produce

69. ¿Cuál tiene mayor número de protones: U-235 o U-238?

menos cambio en el número de masa? ¿En el número

¿Cuál tiene mayor número de neutrones?

atómico?

70. Menciona el número de neutrones y protones en cada

51. ¿Cuál tipo de radiación (alfa, beta o gamma) predomina

uno de estos núcleos: 21 H, 126 C, 5626 Fe, 19779 Au, 9038 Sr y 23892 U.

dentro de un elevador cerrado que desciende a una mina

71. ¿Cómo es posible que un elemento decaiga "hacia ade-

de uranio?

lante en la tabla periódica"; esto es: que decaiga en un

52. Al bombardear núcleos atómicos con "balas" de protones,

elemento con un número atómico más alto?

¿por qué los protones deben acelerar hasta altas energías si

72. ¿Cómo podría un elemento emitir partículas alfa y beta y

van a hacer contacto con los núcleos blanco?

resultar en el mismo elemento?

53. Justo después de que una partícula alfa abandona el

73. Cuando el fósforo (P) radiactivo decae, emite un posi-

núcleo, ¿esperarías que acelere? Defiende tu respuesta.

trón. ¿El núcleo resultante será otro isótopo de fósforo? Si

54. ¿Qué tienen en común todos los isótopos del mismo ele-

no, ¿qué será?

mento? ¿Cómo difieren?

74. "El estroncio-90 es una fuente de betas pura." ¿Cómo es

55. ¿Por qué esperarías que las partículas alfa, con su mayor

que un físico podría poner a prueba esta afirmación?

carga, sean menos capaces de penetrar en los materiales

75. Un amigo sugiere que los núcleos están compuestos de

que las partículas beta con la misma energía?

igual número de protones y electrones, sin neutrones.

56. Dos protones en un núcleo atómico se repelen mutua-

¿Qué evidencia puedes citar para demostrar que tu amigo

mente, pero también se atraen entre sí. Explica.

está equivocado?

57. ¿Cuál interacción tiende a mantener unidas a las partí-

76. El radio-226 es un isótopo común en la Tierra, pero tiene

culas en un núcleo atómico y cuál interacción tiende a

una vida media de alrededor de 1,600 años. Dado que la

separarlas?

Tierra tiene unos 5 mil millones de antigüedad, ¿por qué

58. ¿Qué evidencia apoya la afirmación de que la interacción

todavía queda radio?

nuclear fuerte puede dominar sobre la interacción eléctri-

77. Tu amigo dice que el helio que se utiliza para inflar

ca a distancias cortas en el interior del núcleo?

globos es un producto del decaimiento radiactivo. Otro

59. ¿Puede enunciarse con certeza que, siempre que un

amigo discrepa. ¿Con quién estás de acuerdo?

núcleo emite una partícula alfa o una beta, necesaria-

78. Otro amigo, temeroso de vivir cerca de una planta de

mente se convierte en el núcleo de otro elemento?

fisión, quiere alejarse de la radiación y viajar a las monta-

60. ¿Exactamente qué es un átomo de hidrógeno con carga

ñas altas para dormir por la noche sobre afloramientos de

positiva?

granito. Comenta acerca de esto.

636

PA R T E S I E T E

F ÍSI C A S ATÓ M I C A Y N U CL E A R

79. Otra de tus amigas viajó a las faldas de la montaña para

81. ¿Por qué la datación con carbono no es efectiva para

escapar de los efectos de la radiactividad. Mientras se

determinar las edades de los huesos de los dinosaurios?

baña en la calidez de un manantial térmico, pregunta en

82. ¿La datación con carbono es adecuada para medir la edad

voz alta cómo se mantienen calientes los manantiales.

de los materiales que tienen pocos años de antigüedad?

¿Qué le dirías?

¿Algunos miles de años? ¿Algunos millones de años?

80. Un amigo fabrica un contador Geiger para comprobar la

83. La edad de los manuscritos del Mar Muerto se descubrió

radiación del ambiente normal de la localidad. El conta-

gracias a la datación con carbono. ¿Esta técnica podría

dor suena al azar pero de manera repetida. Otro amigo,

aplicarse si estuvieran grabados en tablillas de piedra?

cuya tendencia es temerle más a lo que entiende menos,

Explica.

hace un esfuerzo por evitar los contadores Geiger y te

84. Elabora dos preguntas de opción múltiple para compro-

mira en busca de consejo. ¿Qué le dirías?

bar que un compañero de clase entiende lo que es la data-

ción radiactiva.

P I E N S A Y D I S C U T E (E V A L U A C I Ó N)

85. Si haces un conteo de 1,000 personas nacidas en el

cantidades considerables en la naturaleza. ¿Cómo puedes

año 2000 y descubres que la mitad de ellas todavía

explicar esto?

viven en 2060, ¿esto significa que un cuarto de ellas

88. Aunque el carbón contiene sólo cantidades mínimas de

estará viva en 2120 y un octavo de ellas vivirá en 2180?

materiales radiactivos, hay más radiación emitida por una

¿Cuál es la diferencia entre las tasas de mortalidad de

planta eléctrica que quema carbón que por una planta de

las personas y las "tasas de mortalidad" de los átomos

fisión, simplemente por la gran cantidad de carbón que

radiactivos?

se quema en las plantas. ¿Qué indica esto acerca de los

86. A juzgar por la Figura 33.22, ¿cuántas partículas alfa y

métodos para prevenir la liberación de radiactividad que

beta se emiten en las series de eventos de decaimiento

suelen aplicarse en los dos tipos de plantas eléctricas?

radiactivo de un núcleo de U-238 a un núcleo de Pb-206?

89. Cuando los alimentos se irradian con rayos gamma

¿Tiene importancia cuál ruta se siga?

provenientes de una fuente de cobalto-60, ¿los alimentos

87. Los elementos por arriba del uranio en la tabla periódica

se vuelven radiactivos? Defiende tu respuesta.

no existen en cantidades considerables en la naturaleza

90. Cuando el autor asistió al bachillerato, hace ya unos

porque tienen vidas medias cortas. Sin embargo, hay

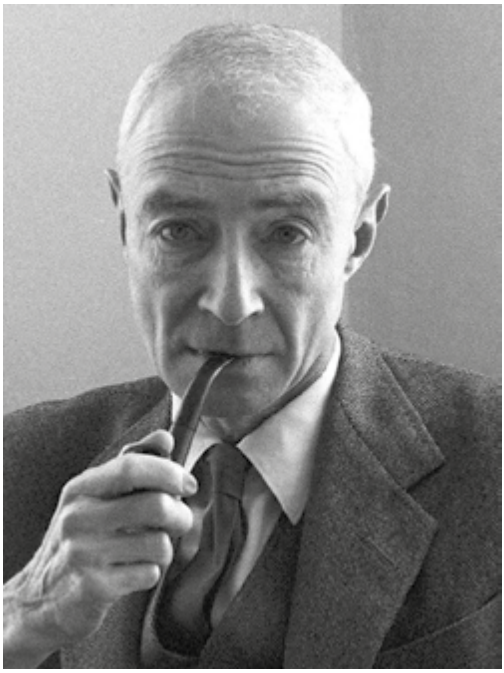
60 años, su profesor le mostró una pieza de uranio y

varios elementos por abajo del número atómico del ura-

midió su radiactividad con un contador Geiger. ¿La lec-

nio con vidas medias igualmente cortas que sí existen en

tura de la misma pieza sería diferente el día de hoy?



34 1

C A P Í T U L O 3 4

Fisión y fusión

nucleares

2

3

34.1 Fisión nuclear

34.2 Reactores de fisión nuclear

34.3 El reactor reproductor

34.4 Energía eléctrica mediante fisión

34.5 Equivalencia masa-energía

4

34.6 Fusión nuclear

5

34.7 Cómo controlar la fusión

1 Lise Meitner, la descubridora de la fisión nuclear; 2 Otto Frisch, su sobrino físico quien le ayudó en su descubrimiento, y

3 Otto Hahn, quien se adjudicó el crédito de ello. 4 El físico italiano Enrico Fermi recibió el Premio Nobel en 1938 por

el trabajo que condujo a la fisión nuclear. Cuando abandonó

Estocolmo, después de recibir el premio para regresar a su nativa

Italia, dijo jocosamente que se había perdido y había terminado

en Nueva York. De hecho, él y su esposa judía, Laura, planea-

ron precavidamente su escape de la Italia fascista. Cuatro años

después, en Chicago, Fermi fue el primero en iniciar la fisión

controlada, y obtuvo la ciudadanía estadounidense en 1945.

5 Robert J. Oppenheimer dirigió el laboratorio de Los Álamos

para el Proyecto Manhattan durante la Segunda Guerra Mundial.

Fue considerado un héroe nacional y fue ampliamente

respetado incluso después de quedar profesional y

personalmente devastado por la cacería de brujas política

de la década de 1950.

Niels Bohr, quien viajaba de manera periódica entre Copen-

hague y Estocolmo. Siguió colaborando con Hahn y otros

Lise Meitner nació en 1878, en Viena. Las niñas de

aquel a época no iban a la escuela pública después

de comenzada la adolescencia. Lise recibió su "certifi-
científicos alemanes.
cado de conclusión" escolar cuando apenas tenía 13 años de
En el otoño de 1938, Hahn y Meitner se reunieron clandes-
edad. Debido a que sus padres no tenían los recursos econó-
tinamente en Copenhague para planear una nueva ronda de
micos para enviarla a Suiza a un internado privado, se inscri-
experimentos con uranio. En diciembre de ese año, Hahn
bió en una "escuela para jovencitas" a fin de prepararse como
escribió a Meitner que él y su colega Fritz Strassmann habían
profesora de francés. Pero su corazón estaba en las matemáti-
descubierto el elemento bario en muestras de uranio puro que
cas y la física, no en el francés. A los 19 años de edad se unió
fueron bombardeadas con neutrones. El os eran buenos quími-
a un grupo de otras jóvenes ambiciosas que estudiaban por
cos y estaban seguros de su resultado, pero tenían dificultades
cuenta propia —con la ayuda de sus tutores privados— para
para explicar la apariencia del bario. Durante las fiestas navi-
prepararse para la universidad. Después de apenas dos años de
deñas, Meitner y su sobrino que estaba de visita, Otto Frisch,
trabajo intenso, aprobó el examen de admisión a la Universi-
en un paseo por los bosques nevados de Suecia se toparon con
dad de Viena (1 de sólo 4 de las 14 mujeres que lo intentaron
una explicación: el núcleo del uranio se rompió en núcleos

ese año), y en 1906, a los 27 años de edad, obtuvo un doctora-

más ligeros, que incluían núcleos de bario. Frisch se apresuró a

do con los más altos honores.

regresar a Copenhague y realizó un experimento que confirmó

Con el estímulo y apoyo financiero de su padre, Meitner

sus hipótesis del rompimiento nuclear. Utilizando un térmi -

fue a Berlín para impulsar su carrera. Max Planck se alejó de

no prestado de la biología, lo llamaron fisión.1 Cuando Niels su política de no dejar que las mujeres asistieran a sus con-Bohr se embarcó con destino a Estados Unidos el 7 de enero,

ferencias y le permitió entrar a su clase. Después de un año

l evó consigo las noticias de la fisión. (La posibilidad de la fisión se convirtió en su ayudante. Luego se unió al químico Otto

nuclear en realidad la había sugerido 5 años antes el científico

Hahn en lo que sería una fructífera colaboración de 30 años.

alemán Ida Noddack, basado en indicios de la obra de Fermi,

Ambos, pronto descubrieron varios isótopos nuevos, y en pero nadie en la época tomó en serio su propuesta.) 1909 Meitner publicó dos artículos sobre la radiación beta.

Meitner y Frisch se dieron cuenta de que, con base en las

Durante la Primera Guerra Mundial, tanto el a como masas conocidas de los núcleos, y la famosa ecuación de Eins-Hahn se tomaron un tiempo para dedicarse a labores de gue-

tein, E 5 mc 2, el proceso de fisión podía liberar mucha ener-rra —el a trabajó como enfermera y técnico de rayos X— pero

gía. Esta liberación de energía es lo que permitió a Frisch, y

también encontraron tiempo para continuar con sus investi-

después a otros científicos, verificar con rapidez la realidad de

gaciones, y en 1918 descubrieron el elemento número 91, el

la fisión en el laboratorio.

protactinio. En la década de 1920, el a se convirtió en la pri-

En una carta a Hahn, Meitner explicó la nueva idea. Pero,

mera mujer en Berlín, tal vez la primera en toda Alemania,

por razones políticas, era imposible que la exiliada Meitner

en ser nombrada profesora. Pronto su trabajo sobre la radiac-

publicara de manera conjunta con Hahn en 1939. De modo

tividad le ganó el reconocimiento de la comunidad científica

que fueron Hahn y Strassmann quienes publicaron el ahora

mundial.

histórico artículo que informaba sobre la producción de bario

Cuando Adolf Hitler llegó al poder en 1933, Meitner, aun-

cuando el uranio se bombardeaba con neutrones. Y fue sólo

que de origen judío, pudo continuar con su trabajo, al menos

Hahn quien, en 1944, recibió el Premio Nobel de Química por

durante un tiempo, protegida por su ciudadanía austriaca. el descubrimiento de la fisión nuclear. En ninguna parte de su Casi todos los demás científicos judíos, incluido su sobrino

discurso de aceptación en 1946 mencionó el papel de Meitner

Otto Frisch, fueron despedidos o forzados a renunciar a sus

y Frisch. Fue el único "protagonista" del prestigioso premio.

puestos, y la mayoría de el os, incluido Albert Einstein, emi-

Los científicos de todo el mundo se dieron cuenta, casi al

graron de Alemania.

mismo tiempo, de que la fisión nuclear tenía el potencial de

En 1934 llegaron noticias del trabajo de Enrico Fermi y

impulsar un arma. Los científicos que emigraron a Estados

sus colegas en Roma, en el cual habían bombardeado muchos

Unidos se pusieron en acción y urgieron a Albert Einstein para

elementos, incluido el uranio, con neutrones, y al parecer que
escribiera una carta de advertencia al presidente Roosevelt.

habían creado nuevos elementos. Meitner y Hahn se unieron

Esto condujo al Proyecto Manhattan y la creación de la bomba

a la búsqueda internacional de "transuránicos", elementos más

atómica comenzó bajo la dirección de Robert J. Oppenheimer.

pesados que el uranio —una búsqueda que inesperadamente

Después de que la guerra terminó, Meitner expresó su ira

condujo a la fisión nuclear—.

contra los científicos alemanes que ayudaron a Hitler (quien,

En julio de 1938, cuando Meitner era amenazada con por fortuna,
no consiguió fabricar una bomba atómica).

su despido, gracias a la ayuda de físicos holandeses escapó a

El a se convirtió en ciudadana sueca en 1949, pero se mudó

Holanda. Después de escapar por un pelo de los oficiales de

a Inglaterra en 1960 y murió en Cambridge en 1968, poco

inmigración alemanes, llegó a salvo, pero sin sus pertenencias.

después de su cumpleaños 90. Su sobrino Otto redactó el epi-

Había salido rápidamente de Alemania, con sólo 10 marcos

tafio de su lápida: "Lise Meitner: una física que nunca perdió

en la bolsa y un anil o que Otto Hahn le había dado, heren-

su humanidad". Un homenaje más reciente lo constituye el

cia de su madre, para sobornar a los guardias fronterizos si

nombre del elemento número 109: meitnerio.

era necesario. Después, Meitner se mudó a Estocolmo, donde

1De manera similar, Ernest Rutherford usó un término biológico cuando eli-ocupó un puesto vacante y estableció una relación laboral con

gió la palabra núcleo para el centro de un átomo.

C A PÍ T U LO 3 4 F ISI Ó N Y FUSI Ó N N U CL E A R ES

639

34.1 Fisión nuclear

La fisión nuclear implica un delicado equilibrio en el interior del núcleo, entre la atracción nuclear y la repulsión eléctrica entre protones. En todos los núcleos de los elementos que se encuentran en la naturaleza, las fuerzas nucleares dominan. Sin embargo, en el uranio, este dominio es tenue. Si el núcleo de uranio se estira en una forma alargada (Figura 34.1), las fuerzas eléctricas pueden empujarlo hacia una forma incluso más alargada. Si la elongación rebasa un punto crítico, las fuerzas nucleares ceden el paso a las eléctricas y el núcleo se separa. Esto es fisión.2 La absorción de un neutrón por un núcleo de uranio que suministra suficiente energía para ocasionar tal elongación. El proceso de fisión resultante puede producir muchas combinaciones diferentes de núcleos más pequeños. Un ejemplo típico es

SCREENCAST: Fisión nuclear

36

55

92

143

56

86

1

235

91

142

1

0 n + 92U

36 Kr + 56 Ba + 3( )

0 n

En esta reacción, observa que un neutrón comienza la fisión del núcleo de uranio y que la fisión produce tres neutrones (amarillos).3 En vista de que los neutrones no tienen carga y no son repelidos por los núcleos atómicos, constituyen buenas "balas nucleares" y pueden causar la fisión de más átomos de uranio, lo que libera todavía La fuerza más grande es nuclear

más neutrones, lo que puede producir todavía más fisiones y liberar una avalancha de todavía más neutrones. A tal secuencia se le llama reacción en cadena, una reacción autosustentable en la que los productos de un evento de reacción estimulan aún más eventos de reacción (Figura 34.2).

Deformación crítica

Una reacción de fisión típica libera energía de alrededor de 200,000,000 electrón-volts (eV).4 (En comparación, la explosión de

una molécula de TNT libera sólo 30 eV.) La masa combinada de los fragmentos de fisión y los neutrones producidos en la fisión es menos que la masa del núcleo de uranio original. La pequeña cantidad de masa perdida convertida en esta sorprendente cantidad de energía es acorde con la ecuación La fuerza más grande es eléctrica de Einstein, E 5 mc 2. La energía de fisión está principalmente en la forma de energía F I G U R A 3 4 .1

cinética de los fragmentos de fisión que se separan unos de otros y de los neutrones ex- La deformación nuclear puede continuar pulsados. Una cantidad más pequeña de energía está en la forma de radiación gamma. hasta la fisión, cuando las fuerzas eléc-El mundo científico fue sacudido por la noticia de la fisión nuclear, no sólo por la enor- tricas de repulsión superan a las fuerzas me liberación de energía, sino también por los neutrones adicionales que se liberaban en el nucleares de atracción.

proceso. Una reacción de fisión típica libera dos o tres neutrones. Estos nuevos neutrones, a su vez, pueden causar la fisión de otros dos o tres núcleos atómicos, lo que libera más energía y un total de cuatro a nueve neutrones más. Si cada uno de estos neutrones divide sólo un núcleo, el siguiente paso en la reacción producirá entre 8 y 27 neutrones, y así de manera sucesiva. En consecuencia, una reacción en cadena completa puede proseguir a una tasa exponencial.

¿Por qué las reacciones en cadena no se presentan en los depósitos de uranio que se encuentran en la naturaleza? Lo harían si todos los átomos de uranio se fisiona-ran con esa facilidad. La fisión ocurre principalmente por el raro isótopo U-235, que 2La fisión que resulta de la absorción de neutrones se llama fisión inducida. En muy pocos casos, sobre todo entre los transuránicos (elementos más pesados que el uranio), los núcleos también pueden experimentar fisión espontánea sin absorción inicial de neutrones.

Neutrón

3En esta reacción, tres neutrones se expulsan cuando ocurre la fisión. En algunas otras reacciones, pueden Núcleo de U-235

expulsarse dos neutrones, u, ocasionalmente, uno o cuatro. En promedio, la fisión de uranio produce 2.5 neu-Fragmento de fisión

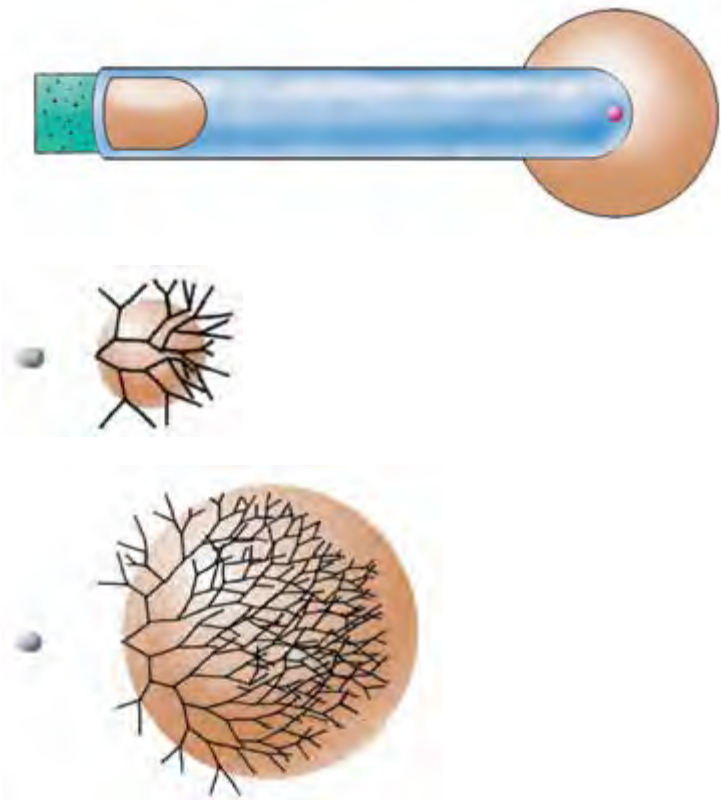
trones por reacción.

4El electrón-volt (eV) se define como la cantidad de energía cinética

que adquiere un electrón al acelerar a través ***F I G U R A 3 4 . 2***

de una diferencia de potencial de 1 V.

Una reacción en cadena.



constituye sólo 0.7% del uranio en las minas de uranio puro. Cuando el isótopo más abundante U-238 absorbe neutrones creados por la fisión del U-235, el U-238 por lo general no experimenta fisión. De modo que cualquier reacción en cadena es detenida por el U-238 que absorbe neutrones, así como por la roca en la que está incrustado el mineral. En el mundo actual, el uranio presente en la naturaleza es demasiado "impu-ro" para experimentar una reacción en cadena de manera espontánea.5

Si una reacción en cadena ocurriera en un pedazo de U-235 del tamaño de una pelota de béisbol, resultaría una enorme explosión. Sin embargo, si la reacción en cadena U-235

U-238

comenzara en un pedazo más pequeño de U-235 puro, no ocurriría ninguna explosión. Esto se debe a la geometría: la razón del área superficial con respecto a la masa es F I G U R A 3 4 . 3

Sólo 1 parte en 140 (0.7%) del uranio

más alta en un pedazo pequeño que en uno grande (tal como hay más piel en seis papas presente en la naturaleza es U-235.

pequeñas que tienen una masa combinada de 1 kg, que en una sola papa de 1 kg). De modo que hay más área superficial en un cúmulo de piezas pequeñas de uranio que en una pieza grande. En una pieza pequeña de U-235, por la superficie escapan tantos neutrones libres que la reacción en cadena se extingue. En una pieza más grande, una fracción más pequeña de neutrones libres escapa antes de desencadenar otra fisión, de modo que la reacción en cadena se acumula, lo que libera una gran cantidad de energía (Figura 34.4). Cuando las masas son mayores que una determinada cantidad, denomi-Los neutrones escapan

nada masa crítica, puede ocurrir una explosión de enorme magnitud.

de la superficie

Considera una gran cantidad de U-235 dividida en dos piezas, cada una con una masa menor que la crítica. Las unidades son subcríticas. Los neutrones de cualquier pieza llegan con facilidad a una superficie y escapan antes de acumular una reacción en cadena mensurable. Pero si las piezas se juntan de manera súbita, el área superficial disminuye. Si la masa combinada es mayor que la crítica, llamada supercrítica, la reacción en cadena se acumula explosivamente. Esto es lo que puede ocurrir en una bomba de fisión nuclear (Figura 34.5). Una bomba en la que las piezas de uranio se juntan es la llamada arma "tipo cañón", en oposición a la ahora más común "arma de implosión".

Los neutrones desencadenan

más reacciones

Explosivo que impulsa la pieza

F I G U R A 3 4 . 4

subcrítica por el cañón para

Fuente radiactiva

La reacción en cadena en una pieza

chocar con otra pieza subcrítica de neutrones

pequeña de U-235 puro se extingue

porque los neutrones se fugan de la

Cañón

superficie muy rápidamente. La pieza

pequeña tiene un área superficial grande

en relación con su masa. En una pieza

F I G U R A 3 4 . 5

más grande, más átomos de uranio y un

Diagrama simplificado de una bomba

área superficial más pequeña se presen-

de fisión de uranio del "tipo cañón"

Piezas subcríticas de uranio

tan a los neutrones.

idealizada.

Construir una bomba de fisión es una tarea colosal. La dificultad consiste en separar suficiente U-235 del más abundante U-238. Los científicos tardaron más de dos años en extraer suficiente U-235 de las menas de uranio para fabricar la bomba que se detonó en Hiroshima en 1945. En esta histórica explosión se usó un pedazo de U-235

probablemente un poco más grande que una pelota de softbol. A la

fecha, la separación de isótopos de uranio sigue siendo un proceso difícil, aunque centrífugas avanzadas lo han hecho menos descomunal de lo que era durante la Segunda Guerra Mundial. Los científicos que trabajaron en el secreto Proyecto Manhattan de la época usaron dos métodos de separación de isótopos. En un método se empleó difusión, donde las moléculas de un compuesto gaseoso (hexafluoruro de uranio) que contiene el U-235 más ligero F I G U R A 3 4 . 6

tienen una rapidez promedio un poco más alta que las moléculas que contienen U-238

Las moléculas más ligeras se mue-

a la misma temperatura. El isótopo más rápido tiene mayor tasa de difusión a través de ven más rápido que las más pesadas

una delgada membrana o pequeña abertura, lo que resulta en un gas un poco enrique-a la misma temperatura y se difun-

den con más facilidad a través de

cido que contiene U-235 en el otro lado (Figura 34.6). La difusión a través de miles de una delgada membrana.

cámaras, al final produjo una muestra suficientemente enriquecida de U-235.

5Hace mucho tiempo en la historia de la Tierra, el porcentaje de U-235 en el uranio natural era más alto de lo que es hoy. El U-235 tiene una vida media más corta que el U-238, de modo que, con el tiempo, el porcentaje de U-235 disminuye. En 1972, el físico francés Francis Perrin, reunió evidencia de que, hace unos 1.7 mil millones de años, existieron reactores naturales en los depósitos de uranio en lo que ahora es Gabón, en África Occidental.

El otro método, usado sólo para un enriquecimiento parcial, empleó la separación magnética de iones de uranio disparados hacia un campo magnético. Los iones de U-235, con masa más pequeña, se desviaron más por el campo magnético que los iones de U-238 y se recolectaron átomo por átomo por una rendija colocada para capturarlos (revisa la Figura 34.14). Después de un par de años, los dos métodos produjeron algunas decenas de kilogramos de U-235.

La separación de isótopos de uranio en la actualidad se logra de un

modo más fácil con una centrífuga de gas. El gas hexafluoruro de uranio se hace girar en un tambor a rapideces tremendamente altas (del orden de 1,500 km/h). Las moléculas de gas que contienen el U-238 más pesado gravitan hacia el exterior como la leche en un separa-dor de lácteos, y el gas que contiene el U-235 más ligero se extrae del centro. Dificultades de ingeniería, superadas sólo en los años más recientes, impidieron el uso de este método durante el Proyecto Manhattan.

P U N T O D E C O N T R O L

1. Una bola de 10 kg de U-235 es supercrítica, pero la misma bola dividida en pequeños pedazos no lo es. Explica.

2. ¿Por qué las moléculas del gas hexafluoruro de uranio hechas con U-235

se mueven un poco más rápido a la misma temperatura que las moléculas del gas hexafluoruro de uranio hechas con U-238?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. Los pedazos pequeños tienen un área superficial combinada más grande que la bola de la cual provienen (tal como el área superficial combinada de la grava es más grande que el área superficial de una roca de la misma masa). Los neutrones escapan por la superficie antes de que una reacción en cadena sostenida pueda acumularse.

2. A la misma temperatura, las moléculas de ambos compuestos tienen la misma energía cinética (1/2 mv 2). Así que las moléculas hechas con el U-235 menos masivo deben tener una rapidez correspondientemente más alta.

34.2 Reactores de fisión nuclear

En general, una reacción en cadena no puede tener lugar en uranio natural puro porque es principalmente U-238. Los neutrones liberados por los átomos de U-235 al fisionarse son neutrones rápidos, capturados con

facilidad por los átomos de U-238, que no se fi-

sionan. Un hecho experimental crucial es que es

mucho más probable que los neutrones lentos sean

capturados por el U-235 que por el U-238.6 Si los

neutrones pueden frenarse, existe mayor posibi-

lidad de que un neutrón liberado por fisión pro-

duzca una fisión en otro átomo de U-235, incluso

en medio de los átomos de U-238, que son más

abundantes y absorben neutrones. Este aumento

puede ser suficiente para permitir que tenga lugar

una reacción en cadena.

Menos de un año después del descubrimiento

de la fisión, los científicos se dieron cuenta de que

F I G U R A 3 4 . 7

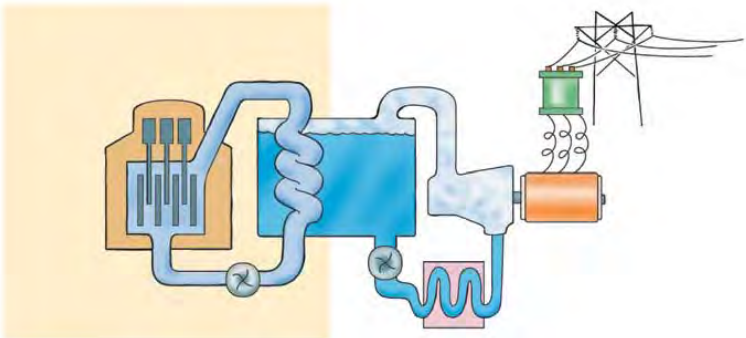
una reacción en cadena con metal uranio ordinario podía ser posible si el uranio se des- Representación artística de la configu-componía en pequeños fragmentos y se separaba por medio de un material que frenara ración de la cancha de squash bajo las gradas del Stagg Field en la University

6Esto es similar a la absorción selectiva de varias frecuencias de luz. Tal como los átomos de varios elementos ab-of Chicago, donde Enrico Fermi y sus

sorben luz de manera diferente, varios isótopos del mismo elemento, aunque químicamente sean casi idénticos, colegas construyeron el primer reactor

pueden tener propiedades nucleares muy diferentes y absorber neutrones de manera distinta.

nuclear.



los neutrones liberados por la fisión nuclear. Enrico Fermi, quien llegó a Estados Unidos procedente de Italia en diciembre de 1938, super -

visó la construcción del primer reactor nuclear (o pila atómica, como se le llamó) en una cancha de squash bajo las gradas del Stagg Field en la University of Chicago. Él y su grupo usaron grafito, una forma

común de carbono, para frenar los neutrones. El 2 de diciembre de

1942 lograron la primera liberación controlada autosostenida de ener-

gía nuclear.

Tres destinos son posibles para un neutrón en un metal de uranio

ordinario. Puede (1) causar la fisión de un átomo de U-235, (2) escapar F I G U R A 3 4 . 8

del metal hacia los alrededores no fisionables, o (3) ser absorbido por un U-238 sin La placa de bronce en el Stagg Field

causar fisión. Para hacer que el primer destino fuera más probable, se usó grafito. El de Chicago conmemora la histórica

reacción en cadena de fisión de Enrico

uranio se dividió en paquetes separados y se enterró a intervalos regulares en casi 400

Fermi. En ella se lee: "El 2 de diciembre

toneladas de grafito. Una analogía simple aclara la función del grafito: si una bola de de 1942, el hombre logró aquí la prime-golf rebota en una pared masiva, es difícil que pierda rapidez, pero si rebota de una ra reacción en cadena autosostenida, con pelota de béisbol, pierde mucha rapidez. El caso del neutrón es similar. Si un neutrón lo cual inició la liberación controlada de

rebota en un núcleo pesado, difícilmente pierde rapidez, pero si rebota en un núcleo de energía nuclear".

carbono más ligero, pierde mucha rapidez. Se dice que el grafito "modera" los neutrones.7 Todo el aparato se llama reactor.

Los reactores de fisión en la actualidad contienen cuatro componentes: combustible nuclear, barras de control, un moderador y un fluido (por lo general agua) para extraer el calor del reactor. El combustible nuclear es principalmente U-238 más cerca de 3 a Una gran abundancia de combus-5% de U-235. Dado que el U-235 está tan altamente diluido con U-238, una explosión tible nuclear para reactores de

como la de una bomba nuclear no es posible.8 La tasa de reacción, que depende del fisión estará disponible cuando se

desmantelen los miles de armas

número de neutrones disponibles para iniciar la fisión de otros núcleos de U-235, por nucleares fabricadas durante las

lo general se controla mediante barras insertadas en el reactor. Las barras de control décadas anteriores. Cuando el

están hechas de un material que absorbe neutrones, por lo general cadmio o boro. El Pu-239 destinado a las bombas

agua que rodea al combustible nuclear con frecuencia funciona como moderador y se mezcle con las toneladas del

como refrigerante. El agua se mantiene bajo alta presión para mantenerla a una tem-agotado U-238 actualmente en

peratura alta sin hervir. Calentada por la fisión, esta agua entonces transfiere el calor almacenamiento, los reactores po-a un segundo sistema de agua a menor presión, el cual pone en marcha una turbina y drán suministrar al mundo energía

eléctrica limpia durante muchos

un generador eléctrico. Se utilizan dos sistemas de agua independientes para que no años.

llegue absolutamente nada de radiactividad a la turbina.

Líneas de

Transformador

transmisión

Agua hirviendo

Vapor

Reactor

Barras

de control

Intercam-

biador

Barras de

de calor

Turbina

combustible

(calentador)

Condensador

Generador

Bombas

F I G U R A 3 4 . 9

de agua

Diagrama de una planta de fisión

nuclear.

Producción de calor

Producción de electricidad

7El agua pesada, que contiene el isótopo pesado del hidrógeno, deuterio, es un moderador incluso más eficiente.

Esto se debe a que, en una colisión elástica, un neutrón transfiere mayor porción de su energía al núcleo de deuterio de la que transferiría al núcleo más pesado de carbono, y un deuterón nunca absorbe un neutrón, como ocasionalmente hace un núcleo de carbono.

8Sin embargo, en el peor de los accidentes, es posible que el calor sea suficiente para fundir el núcleo del reactor, y, si el edificio del reactor no es lo suficientemente resistente, la radiactividad escapará al ambiente. Uno de tales accidentes ocurrió en el reactor de Chernobyl en 1986, en Ucrania, que entonces era una república constitutiva de la Unión Soviética. Otro desastre nuclear fue resultado del tsunami de 2012 en Fukushima, Japón.

C A PÍ T U LO 3 4 F ISI Ó N Y FUSI Ó N N U CL E A R ES

643

P U N T O D E C O N T R O L

¿Cuál es la función de un moderador en un reactor nuclear? ¿De las barras de control?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

Un moderador frena los neutrones que normalmente son demasiado rápidos para ser absorbidos con facilidad por los isótopos

fisionables, como el U-235. Las barras de control absorben más neutrones cuando son empujados hacia el reactor y menos neutrones cuando son jalados afuera del reactor. Por tanto, controlan el número de neutrones que participan en la reacción en cadena.

PLUTONIO

Aprincipios del siglo XIX, el planeta más lejano conocido que el U-235, experimenta fisión cuando captura un neutrón.

en el sistema solar era Urano. Al primer planeta en ser

Mientras que la separación de U-235 fisionable del metal uranio

descubierto más lejos de Urano se le llamó Neptuno. En

es un proceso muy difícil (porque el U-235 y el U-238 tienen las

1930 se descubrió lo que pareció ser un planeta más lejano que

mismas características químicas), la separación de plutonio del metal Neptuno y se le nombró Plutón. Durante esta época el elemento

uranio es relativamente sencilla. Esto se debe a que el plutonio es un más pesado conocido era el uranio, llamado así por Urano unos

elemento distinto del uranio, con sus propias propiedades químicas.

años después del descubrimiento del planeta. Como correspondía, al

El elemento plutonio es químicamente tóxico en el mismo

primer elemento transuránico descubierto se le llamó neptunio y al sentido que lo son el plomo y el arsénico. Ataca al sistema nervioso

segundo elemento transuránico se le nombró plutonio.

y puede causar parálisis. La muerte puede producirse si la dosis es

El neptunio se produce cuando un núcleo de U-238 absorbe

suficientemente grande. Por fortuna, el plutonio no permanece

un neutrón. En lugar de experimentar fisión, el núcleo emite

en su forma elemental durante mucho tiempo porque se combina

una partícula beta y se convierte en neptunio-239, un isótopo

rápidamente con oxígeno para formar tres compuestos: PuO,

del siguiente elemento en la tabla periódica. Su vida media es de

PuO2 y Pu2O3, todos los cuales son relativamente benignos por

sólo 2.4 días, de modo que no anda por aquí mucho tiempo. El

sus características químicas. No se disuelven en agua ni en sistemas

neptunio-239 es un emisor beta y muy pronto se convierte en

biológicos. Estos compuestos de plutonio no atacan el sistema

plutonio-239, cuya vida media es de alrededor de 24,000 años.

nervioso y se ha encontrado que son químicamente inocuos.

Dura un tiempo considerable. El isótopo plutonio-239, al igual

Sin embargo, el plutonio en cualquier forma es radiactivamente

tóxico. Es más tóxico que el uranio, aunque menos tóxico que el

F I G U R A 3 4 . 1 0

radio. El plutonio emite partículas alfa de alta energía, que destruyen Cuando un núcleo de U-238 absorbe

células en lugar de sólo perturbarlas y conducir a mutaciones. Es

un neutrón, se convierte en un

interesante que las células dañadas, y no las células destruidas, sean núcleo de U-239. En alrededor de

las que contribuyen al cáncer. Es por esto que el plutonio se clasifica media hora, este núcleo emite una

relativamente bajo como sustancia cancerígena. El mayor peligro

partícula beta, lo que resulta en un

que plantea el plutonio al ser humano es la posibilidad de utilizarlo núcleo de más o menos la misma

en bombas de fisión nuclear. Su utilidad está en los reactores de

masa pero con una unidad más de

fisión, en particular en los reactores reproductores.

carga. Éste ya no es uranio; es un

nuevo elemento: neptunio. Después

de que el neptunio, a su vez, emite

una partícula beta, se convierte en

92

92

93

94

plutonio. (En ambos eventos tam-

146

147

146

145

bién se emite un antineutrino, que

no se muestra.)

Uranio-238

Uranio-239

Neptunio-239

Plutonio-239

P U N T O D E C O N T R O L

El plutonio con grado de arma-

¿Por qué el plutonio no existe en cantidades considerables en los depósitos mento suele ser 93% Pu-239.

naturales de minerales?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

En la escala del tiempo geológico, el plutonio tiene una vida media relativamente corta, de modo que cualquiera que exista se produjo por transmutaciones muy VIDEO: Plutonio

recientes de isótopos de uranio.

34.3 El reactor reproductor

Una característica notable del poder de la fisión es la reproducción de plutonio a partir del U-238 no fisionable. La fisión libera neutrones que convierten el U-238 no fisionable, relativamente abundante, en U-239, que tiene decaimiento beta y se convierte en Np-239, el cual, a su vez, tiene decaimiento beta y se convierte en plutonio fisionable: SCREENCAST: Plutonio

Pb-239. De modo que, además de la abundante energía producida, en el proceso se y reproducción

reproduce el combustible de fisión a partir del relativamente abundante U-238.

F I G U R A 3 4 . 1 1

El Pu-239 o el U-233, así como el

U-235, experimentan fisión cuando

capturan un neutrón.

En todos los reactores de fisión ocurre cierta reproducción, pero un reactor reproductor está diseñado de manera específica para reproducir más combustible fisionable del que se le pone. Usar un reactor reproductor es análogo a llenar el tanque de gasolina de tu automóvil con agua, agregar algo de gasolina, luego conducir el automóvil,

¡y tener más gasolina al final del viaje que al comienzo! El principio básico del reactor reproductor es muy atractivo: después de algunos años de funcionamiento, una planta eléctrica con un reactor reproductor puede producir enormes cantidades de energía al Algunas personas protestan con-tiempo que reproduce el doble de combustible que tenía al principio.

tra la energía nuclear: "¡No a la

El inconveniente de los reactores reproductores es la enorme complejidad para lograr energía nuclear!". Por el contrario,

un funcionamiento satisfactorio y seguro. Estados Unidos abandonó

los reproductores la postura de este libro es "¡Conoce la energía nuclear!": primero

en la década de 1980, y sólo Francia, Alemania, India y China todavía invierten en conoce algo de sus promesas,

ellos. Los funcionarios en estos países señalan que los suministros de uranio natural así como sus inconvenientes,

son limitados. Con las tasas actuales de consumo, todas las fuentes naturales de uranio antes de decir sí o no a la energía

pueden agotarse en un siglo. Entonces, los países que decidan usar reactores repro-nuclear.

ductores bien podrían tener que excavar en los desechos radiactivos que alguna vez enterraron.9

P U N T O D E C O N T R O L

239

Com

92U pleta estas re

239

92 a

U cciones, que ocurren en un reactor reproductor:

239

0

0

e

239U

92

1

— U →

1

− e 92

0

239

239

Np →

0 e

1

− e

93

93

− Np

1

239

239Np

93Np

93

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

239Np; 239Pu. (Los antineutrinos también se emiten en estos procesos de decaimiento 93

94

beta, y escapan sin que se les observe.)

34.4 Energía eléctrica mediante fisión

La energía disponible de la fisión nuclear se introdujo al mundo en la forma de bombas nucleares. Esta violenta imagen todavía influye en la manera de ver la energía nuclear.

Si se agrega a esto el terrible desastre de 1986 en Chernobyl, en la Unión Soviética, se descubrirá que muchas personas opinan que la energía nuclear es una tecnología SCREENCAST: Energía de fisión

diabólica. No obstante, alrededor de 20% de la energía eléctrica en Estados Unidos 9Muchos científicos nucleares no consideran que el enterramiento profundo sea una solución deseable al problema de los desechos nucleares. Los dispositivos que se estudian en la actualidad podrían, en principio, convertir los átomos radiactivos de larga vida del combustible del reactor empleado, en átomos no radiactivos de corta vida. Existe la posibilidad de que los desechos nucleares no importunen a las generaciones futuras de manera indefinida, como suele pensarse.

C A PÍ T U LO 3 4 F ISI Ó N Y FUSI Ó N N U CL E A R ES

645

es generada por reactores de fisión nuclear. Estos reactores, en ocasiones denominados nukes, son simplemente hornos nucleares. Al igual que los hornos de combustible fósil, Edificio de contención

no hacen nada más elegante que hervir agua para producir vapor para una turbina. La para el reactor nuclear

mayor diferencia práctica es la cantidad de combustible involucrado. Un kilogramo de combustible uranio, una pieza más pequeña que una pelota de béisbol, produce más energía que 30 vagones de carga repletos de carbón.

Una desventaja de la energía de fisión es que se generan productos de desecho radiactivos. Los núcleos atómicos ligeros son más estables cuando se componen de igual número de protones y neutrones, y son principalmente los núcleos pesados los que necesitan más neutrones que protones para su estabilidad. Por ejemplo, en el U-235 hay 143

neutrones pero sólo 92 protones. Cuando el uranio se fisiona en dos elementos de peso medio, los neutrones adicionales de sus núcleos los hacen inestables. Por tanto, estos fragmentos son radiactivos, y la mayor parte de ellos tiene vidas medias muy cortas. Sin embargo, algunos de ellos tienen vidas medias de miles de años. Para la eliminación F I G U R A 3 4 .12

segura de estos productos de desecho, así como de los materiales que se vuelven radiac- El reactor nuclear se aloja en el tivos en la producción de combustibles nucleares, se necesitan toneles y procedimientos interior de un edificio de contención especiales de almacenamiento. Si bien la energía de fisión se remonta a medio siglo, la con forma de domo, que está diseñado tecnología de

eliminación de desechos radiactivos sigue en la etapa de desarrollo.

para prevenir la liberación de isótopos

Los beneficios de la energía de fisión son (1) ofrece abundante electricidad; (2) aho- radiactivos en caso de un accidente.

rra muchos miles de millones de toneladas de carbón, petróleo y gas natural cada año que literalmente se convierten en calor y humo, y en el largo plazo pueden ser más valiosos como fuentes de moléculas orgánicas; y (3) elimina las megatoneladas de óxidos de azufre y otras toxinas, así como el gas de efecto invernadero, dióxido de carbono, que se liberan al aire cada año por la quema de estos combustibles.

Los inconvenientes son (1) el problema de almacenar desechos radiactivos, (2) la Los desechos nucleares pueden

producción de plutonio y el peligro de la proliferación de armas nucleares, (3) la libera-

"quemarse" en reactores espe-

ción a bajo nivel de materiales radiactivos en el aire y el subsuelo, y, lo más importante, ciales que los transmutan en ele-

(4) el riesgo de una liberación accidental de grandes cantidades de radiactividad.

mentos más benignos y, por tanto,

esto refuta la objeción de que

Para tener una opinión razonada es indispensable no sólo examinar los beneficios y los desechos nucleares se vierten

los inconvenientes de la energía de fisión, sino también que se comparen sus beneficios en el regazo de las generaciones

e inconvenientes con los de otras fuentes de energía.

futuras.

P U N T O D E C O N T R O L

Más radiación ambiental rodea a una planta eléctrica típica de carbón que la que rodea a una planta de fisión. ¿Qué indica esto del

blindaje que suele rodear a los dos tipos de plantas eléctricas?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Las plantas eléctricas de carbón son, al parecer, tan estadounidenses como la tarta de manzana y (al momento de escribir esto) no necesitan un blindaje que restrinja la emisión de partículas radiactivas. Las plantas de fisión, por otra parte, exigen un blindaje que asegure rigurosos niveles bajos de emisiones radiactivas.

34.5 Equivalencia masa-energía

En 1905, Albert Einstein descubrió que la masa en realidad es energía "coagulada".

Masa y energía son dos caras de la misma moneda, como se enuncia en su celebrada ecuación E 5 mc 2. En esta ecuación, E representa la energía que cualquier masa tiene en reposo, m representa la masa y c es la rapidez de la luz. La cantidad c 2 es la constante de SCREENCAST: Equivalencia

proporcionalidad de energía y masa. Esta relación entre energía y masa es la clave para masa-energía

entender por qué y cómo se libera energía en las reacciones nucleares.

Mientras más energía esté almacenada en una partícula, mayor será la masa de la partícula. ¿La masa de un nucleón dentro de un núcleo es la misma que la masa del mismo

nucleón afuera de un núcleo? Esta pregunta puede responderse al considerar el trabajo que se requeriría para separar los nucleones de un núcleo. A partir de la física se sabe que el trabajo, que es energía utilizada, es igual a fuerza × distancia. Piensa en la cantidad de fuerza requerida para sacar un nucleón del núcleo a través de una distancia suficiente para superar la fuerza nuclear fuerte atractiva, lo que se indica de manera cómica en la Figura 34.13. Se requeriría un enorme trabajo. Este trabajo es energía agregada al nucleón que se jala.

La diferencia de masa entre un nucleón afuera de un núcleo y la masa promedio de F I G U R A 3 4 . 1 3

los nucleones encerrados dentro de un núcleo se relacionan con la "energía de enlace"

Para sacar un nucleón de un núcleo

atómico se requiere trabajo. Este trabajo

del núcleo. Para el uranio, la diferencia de masa es de más o menos 0.8%, u 8 partes entra en la energía de masa.

por 1,000. La reducción de 0.8% en la masa promedio del nucleón dentro de un átomo de uranio indica la energía de enlace del núcleo: cuánto trabajo se requeriría para des-montar el núcleo.10 Dicho trabajo sería de alrededor de 8 millones de eV por nucleón.

La verificación experimental de esta conclusión es uno de los triunfos de la física moderna. La masa promedio por nucleón dentro de los núcleos de los isótopos de los diversos elementos puede medirse con una precisión de 1 parte por millón o mejor. Un medio para hacer esto es con un espectrómetro de masas (Figura 34.14).

Los iones se dirigen hacia la rendija de entrada

con una velocidad regulada mediante campos

Rendija

eléctricos y magnéticos en un ensamble de cañón

de entrada

de iones (no se muestra)

Los protones individuales golpean aquí.

Los iones de C-12 golpean aquí

Los iones de U-235 golpean aquí

F I G U R A 3 4 . 1 4

Los iones de U-238 golpean aquí

El espectrómetro de masas. Los iones

Todo este montaje se

Fotodetector

con una rapidez fija se dirigen hacia el

“tambor” semicircular, donde se hacen

coloca entre los polos

mover en trayectorias semicirculares

de un electroimán

mediante un campo magnético intenso.

¿Cuáles se moverán en arcos más peque-

ños: los núcleos pesados o los núcleos

ligeros?

En un espectrómetro de masas, los iones cargados con rapideces idénticas se dirigen hacia un campo magnético, donde se desvían en arcos circulares. Mientras mayor sea la inercia del ión, más resistirá a la desviación y mayor será el radio de su trayectoria curva. La fuerza magnética hace que los iones más pesados se muevan en arcos más largos y los iones más ligeros en arcos más pequeños. Los iones pasan a través de rendijas de salida, donde se recolectan, o golpean un detector, como una película fotográfica.

Un isótopo se elige como estándar, y su posición sobre la película del espectrómetro de masas se usa como punto de referencia. El estándar es el isótopo común del carbono, C-12, a cuya masa atómica se le asigna el valor de 12.00000 unidades de masa atómica. Recuerda que la unidad de masa atómica (uma) se define como precisamente Masa nuclear

un doceavo la masa del átomo de carbono-12 común. Con esta referencia se miden los valores de masa atómica de los otros átomos. Puedes ver que, en un átomo de C-12, la masa promedio por nucleón es exactamente 1.00000. Esto es menos que la masa Número atómico

o de un átomo de hidrógeno o de un neutrón libre, que son, de manera respectiva, F I G U R A 3 4 . 1 5

1.007825 y 1.00867 uma.

La gráfica muestra cómo la masa

En la Figura 34.15 se presenta una gráfica de la masa nuclear como función del nuclear aumenta con el número atómico

creciente.

número atómico. La gráfica se inclina hacia arriba con el número atómico creciente 10En sentido estricto, ésta se agrega a la masa combinada del nucleón que se remueve y el núcleo que queda detrás. En realidad no es posible medir la masa de un nucleón individual dentro de un núcleo. Sólo puede medirse la masa total del núcleo y dividirla entre el número de nucleones que hay ahí para obtener la masa promedio por nucleón, que es lo que resulta ser aproximadamente 0.8% menor que la masa de un nucleón libre.

C A PÍ T U LO 3 4 F ISI Ó N Y FUSI Ó N N U CL E A R ES

647

T A B L A 3 4 . 1 MASAS Y MASAS POR NUCLEÓN DE ALGUNOS ISÓTOPOS

Isótopo

Símbolo

Masa (uma)

Masa/Nucleón (uma)

Neutrón

n

1.008665

1.008665

Hidrógeno

H

1

1.007825

1.007825

1

Deuterio

2H

2.01410

1.00705

1

Tritio

3H

3.01605

1.00535

1

Helio-4

4He

4.00260

1.00065

2

Carbono-12

12C

12.00000

1.000000

6

Hierro-56

56Fe

55.93494

0.99884

26

Cobre-63

63CU

62.92960

0.99888

29

Criptón-90

90Kr

89.91952

0.99911

36

Bario-143

143Ba

142.92063

0.99944

56

Uranio-235

235U

235.04393

1.00019

92

justo como se espera; esto indica que los elementos son más masivos conforme aumenta el número atómico. (La pendiente aumenta porque existen proporcionalmente más neutrones en los átomos más masivos.)

Una gráfica más importante es la que contiene la masa promedio por nucleón para los elementos del hidrógeno al uranio (Figura 34.16). Quizá ésta sea la gráfica más importante de este libro, porque es la clave para entender la energía asociada con los procesos nucleares, tanto fisión como fusión. Para obtener la masa promedio por nucleón, divide la masa total de un átomo por el número de nucleones en el núcleo. (De manera similar, si divides la masa total de una habitación llena con gente entre el número de personas en la habitación, obtienes la masa promedio por persona.) El principal hecho que se aprende a partir de la Figura 34.16 es que la masa promedio por nucleón varía de un núcleo a otro.

F I G U R A 3 4 . 1 6

La gráfica muestra que la masa pro-

medio por nucleón en el núcleo varía

de un extremo de la tabla periódica al

otro. Puede decirse que los nucleones

individuales tienen más masa en

Masa por nucleón

los núcleos más ligeros (hidrógeno),

menos masa en los núcleos de hierro,

y una masa intermedia en los núcleos

H

Fe

U

más pesados (uranio). (La escala verti-

Número atómico

cal está exagerada.)

La mayor masa por nucleón ocurre para el hidrógeno, cuyo protón central solo no tiene energía de enlace para bajar su masa. Conforme se avanza hacia elementos más allá del hidrógeno, la Figura 34.16 indica que la masa por nucleón disminuye y es mínima para el hierro. El núcleo de hierro retiene sus nucleones con más precisión que cualquier otro núcleo. Más allá del hierro, la tendencia se invierte conforme la La gráfica de la Figura 34.16

revela la energía del núcleo

repulsión entre protones se vuelve más importante y la energía de enlace por nucleón atómico, probablemente la

disminuye de modo gradual (lo que significa que la masa por nucleón aumenta poco a principal fuente de energía en el

poco). Esto continúa a lo largo de la lista de elementos.

Universo, razón por la cual puede

A partir de la Figura 34.17 puedes ver por qué se libera energía cuando un núcleo considerarse como la gráfica más

de uranio se divide en dos núcleos con número atómico más bajo. Cuando el núcleo de importante de este libro.

uranio se divide, las masas de los dos fragmentos de fisión se encuentran aproximadamente a medio camino entre las masas del uranio y del hidrógeno sobre la escala

F I G U R A 3 4 . 1 7

La masa promedio de cada nucleón

en un núcleo de uranio es mayor que

la masa promedio de cada nucleón en

cualquiera de sus fragmentos de fisión

El nucleón en un núcleo

nuclear. Esta reducción en masa se

de uranio tiene

transforma en energía. En consecuencia,

El nucleón en un fragmento

más masa

la fisión nuclear es un proceso de libera-

de uranio tiene

ción de energía.

menos masa

Masa por nucleón

Núcleo de

uranio-235

Los fragmentos de núcleo de uranio que

ahora son núcleos de átomos como bario y criptón

Kr

Ba

U

Número atómico

horizontal de la gráfica. Es más importante observar que la masa por nucleón en los fragmentos de fisión es menor que la masa por nucleón cuando el mismo conjunto de nucleones se combina en el núcleo de uranio. Cuando esta reducción en masa se multiplica por la rapidez de la luz al cuadrado, ésta es igual a 200,000,000 eV, la energía producida por cada núcleo de uranio que experimenta fisión. Como se mencionó antes, la mayor parte de esta enorme cantidad de energía es la energía cinética de los fragmentos de la fisión.

F I G U R A 3 4 . 1 8

La masa de un núcleo no es igual a la

suma de las masas de sus partes.

(a) Los fragmentos de fisión de un

núcleo pesado como el uranio son

menos masivos que el núcleo de uranio.

(b) Dos protones y dos neutrones son

más masivos en sus estados libres que

cuando se combinan para formar un

núcleo de helio.

(a)

(b)

Puedes considerar que la curva de masa por nucleón es un val e de energía que comienza en el punto más alto (hidrógeno), baja precipitadamente hacia el punto más bajo La energía de enlace reduce la

masa de un núcleo en exactamen-

(hierro), y luego sube de manera más gradual hasta el uranio. El hierro está en el fondo del te la equivalente en masa

val e de energía y es el núcleo más estable. Esto significa que es el núcleo más firmemente (E/ c 2) de dicha energía de enla-enlazado; para separarlo en sus nucleones constituyentes se requiere más energía por nu-ce. Mientras más energía de

cleón que para cualquier otro nucleón.

enlace, menos masa. El núcleo

Toda la energía nuclear en la actualidad se obtiene a partir de la fisión nuclear. Una de hierro tiene la mayor energía de

enlace por nucleón y la menor

fuente de energía a largo plazo más prometedora debe encontrarse en el lado izquierdo masa por nucleón.

del valle de la energía.

T A B L A 3 4 . 2 GANANCIA DE ENERGÍA A PARTIR DE L A FISIÓN DE UR ANIO

Reacción:

235U n → 143Ba 90Kr 3 n m

Equilibrio de masa:

235.04393 1.008665 142.92063 89.91952 3(1.008665) m

Pérdida de masa:

m 0.186 uma

*Ganancia de energía:**

E mc 2 0.186 uma 931 Mev/uma 173 Mev

Ganancia energía/nucleón:

E 236 173 Mev236 0.73 MeV/nucleón

931 MeV es el equivalente en energía de 1 uma; de ahí el factor de conversión 931 MeV/uma. Además de lo anterior, existe una demora adicional en la liberación de energía de más o menos 25 MeV de los fragmentos de fisión radiactivos, para una liberación total de energía por evento de fisión de cerca de 200 MeV.

C A PÍ T U LO 3 4 F ISI Ó N Y FUSI Ó N N U CL E A R ES

649

FÍSICA EN LA SEGURIDAD AEROPORTUARIA

Una versión del espectrómetro de masas que se muestra en la Figura 34.14 se emplea en la seguridad aeroportuaria. En lugar de una separación electromagnética se utiliza la movilidad iónica para descubrir ciertas moléculas, principalmente las que tienen bajo contenido en nitrógeno, que son características de los explosivos. El personal de seguridad toma una muestra de tu

equipaje u otras pertenencias con un pequeño disco de papel, que luego colocan en un aparato que lo calienta hasta expulsar vapor de éste. Las moléculas en el vapor se ionizan mediante la exposición a radiación beta de una fuente radiactiva. La mayoría de las moléculas se convierten en iones positivos, mientras que las moléculas con alto contenido en nitrógeno se vuelven negativas, y por ello se mueven en contra de un flujo de aire hacia un detector con carga positiva. El tiempo para que un ión negativo llegue al detector indica la masa del ión: mientras más pesado sea el ión, más tardará en llegar al detector.

ascendente impactan sobre el cuerpo. Entonces el aire es "olfateado"

El mismo proceso ocurre en los escaneos corporales, en los con la misma técnica, en busca de unos 40 tipos de explosivos y 60 cuales una persona se pone de pie momentáneamente en una región tipos de residuos de narcóticos. Listo: luz verde significa que no se cerrada del tamaño de una caseta telefónica, donde ráfagas de aire detectó nada; y luz roja significa… ¡oh, oh!

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¡Espera un minuto! Si los protones y los neutrones aislados tienen masas mayores que 1.0000 uma, ¿por qué 12 de ellos en un núcleo de carbono no tienen una masa combinada mayor que 12.0000 uma?

2. Corrige el siguiente enunciado incorrecto: Cuando un elemento pesa do, como el uranio, experimenta fisión, hay menos nucleones después de la reacción que antes.

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. Cuando sacas un nucleón del núcleo, realizas trabajo sobre éste y gana energía.

Al momento que dicho nucleón regresa al núcleo, pierde energía. Perder ener -

gía significa perder masa. Es como si cada nucleón, en promedio, adelgazara hasta una masa de exactamente 1.0000 uma cuando se une con los otros 11 nucleones para formar C-12. Si de nuevo los sacas, obtendrás la masa original. Esto es debido a que E 5 mc 2.

2. Cuando un elemento pesado, como el uranio, experimenta fisión, no hay menos nucleones después de la reacción. En vez de ello, hay menos masa en el mismo número de nucleones.

34.6 Fusión nuclear

La inspección de la gráfica de masa por nucleón frente al número atómico en la Figura 34.19 muestra que la parte más inclinada de la colina energética va desde el hidrógeno hasta el hierro. La energía se gana conforme los núcleos ligeros se funden (lo que quiere decir que se combinan). Esta combinación de núcleos es la fusión nuclear, lo opuesto de la fisión nuclear. A partir de la Figura 34.19 puedes ver que, conforme te mueves a lo largo de la lista de elementos, del hidrógeno al hierro (el lado izquierdo del valle de energía), la masa promedio por nucleón disminuye. Por tanto, si dos nú-SCREENCAST: Fusión nuclear

cleos pequeños se funden, la masa del núcleo fusionado sería menor a la masa de los dos núcleos individuales antes de la fusión. Conforme los núcleos ligeros se fusionan se libera energía.

F I G U R A 3 4 . 1 9

La masa promedio de un nucleón en el

Nucleón en el núcleo de hidrógeno-2

hidrógeno es mayor que su masa pro-

tiene más masa

medio cuando se fusiona con otro para

convertirse en helio. La masa reducida es

Nucleón en el núcleo de helio-4

masa que se convirtió en energía, razón

por la cual la fusión nuclear de elemen-

tiene menos masa

tos ligeros es un proceso de liberación de

energía.

Masa por nucleón

Número atómico

Considera la fusión del hidrógeno. Para que ocurra una reacción de fusión, los núcleos deben chocar con una rapidez muy grande, para superar su repulsión eléctrica En cierto sentido, los nucleo-mutua. Las rapideces requeridas corresponden a las temperaturas extremadamente alnes en los elementos pesados

tas que se encuentran en el Sol y otras estrellas. La fusión producida por temperaturas quieren perder masa y ser como

altas se llama fusión termonuclear. En las temperaturas altas del Sol, aproximada-los nucleones en el hierro. Y los

mente 657 millones de toneladas de hidrógeno se fusionan para generar 653 millones nucleones en los elementos ligeros

también quieren perder masa y

de toneladas de helio cada segundo. Los 4 millones de toneladas de masa "perdida" se volverse más como los del hierro.

convierten en energía. Tales reacciones son, de manera muy literal,

quemas nucleares.

Curiosamente, la mayor parte de la energía de la fusión nuclear está en la energía cinética de los fragmentos. Cuando los fragmentos se detienen y capturan, la energía de la fusión se convierte en calor. En el Sol, este calor termina como fotones radiados desde la superficie. En las reacciones de fusión del futuro, parte de este calor se transformará en electricidad.

F I G U R A 3 4 . 2 0

Ejemplo ficticio: los "imanes de hidróge-

no" pesan más cuando están separados

que cuando están juntos.

1.8 N

1 N

1 N

La fusión termonuclear es análoga a la combustión química ordinaria. Tanto en la quema química como en la nuclear, una temperatura alta inicia la reacción; la liberación de energía por la reacción mantiene una temperatura suficiente para extender el fuego. El resultado neto de la reacción química es una combinación de átomos en moléculas más firmemente enlazadas. En las reacciones nucleares, el resultado neto son núcleos que están enlazados de manera más firme. En ambos casos, la masa disminuye conforme se libera energía. La diferencia entre las quemas química y nuclear en esencia está en la escala: la energía de la nuclear está en MeV, y la energía de la química en eV

(en consecuencia, hay pequeñas pérdidas en masa indetectables químicamente).

En las reacciones de fisión, la cantidad de materia que se convierte en energía es

+ + +

+

+ +

+

aproximadamente 0.1%; en la fusión, puede ser de hasta 0.7%. Estos números se apli-Energía

2

2

3

+

+ 10n + 3.26 MeV

can ya sea que el proceso tenga lugar en bombas, en reactores o en estrellas. En la Fi-1H 1H

2He

gura 34.21 se muestran dos reacciones de fusión típicas. La mayoría de las reacciones

+ +

+

+

+ +

+Energía

producen al menos un par de partículas; por ejemplo, un par de núcleos de deuterio 2

3

4

+

+ 10n + 17.6 MeV

1H 1H

2He

que se fusionan pueden producir un núcleo de helio-3 y un neutrón en lugar de un núcleo de helio-4 solo. Cualquier reacción es correcta en lo que se refiere a la agrega-F I G U R A 3 4 . 2 1

ción de nucleones y cargas, pero el caso del núcleo solo no está en concordancia con la Dos de muchas reacciones de fusión.

C A PÍ T U LO 3 4 F ISI Ó N Y FUSI Ó N N U CL E A R ES

651

T A B L A 3 4 . 3 GANANCIA DE ENERGÍA A PARTIR DE FUSIÓN DE ISÓTOPOS DE HIDRÓGENO

Reacción:

2H 1 3H → 4He 1 n 1 D m

2

Equilibrio de masa:

2.01410 3.01605 4.00260 1.008665 m

Cambio en la masa:

m 0.01888 uma

Ganancia de energía:

E mc 2; 0.01888 uma 931 Mev/uma 17.6 Mev

Ganancia energía/nucleón:

E 5 17.6 Mev/5 3.5 Mev/nucleón

conservación de la cantidad de movimiento y de la energía. Si un solo núcleo de helio Bomba atómica

se aleja después de la reacción, agrega cantidad de movimiento que no estaba ahí ini-de "fisión"

cialmente. O, si permanece sin movimiento, no hay mecanismo para la liberación de energía. De este modo, debido a que una sola partícula de producto no puede moverse ni quedarse quieta, no se forma. La fusión por lo regular requiere la creación de al menos dos partículas para compartir la energía liberada.11

La Tabla 34.3 muestra la ganancia de energía a partir de la fusión de los isóto -

pos de hidrógeno deuterio y tritio. Ésta es la reacción propuesta por las plantas de TNT

fusión de plasma del futuro. De acuerdo con el plan, los neutrones de alta energía Fuente

escaparán del plasma en el recipiente del reactor y calentarán un manto (capa fértil) de neutrones

circundante de material para proporcionar energía útil. Los núcleos de helio que per-Uranio

manezcan ayudarán a mantener caliente el plasma. Otra reacción, no descrita aquí, o plutonio

proporcionará el tritio, que no se encuentra de forma natural sobre la Tierra (debido a Bomba de hidrógeno

su corta vida media de 12 años).

de "fusión"

Los elementos un tanto más pesados que el hidrógeno liberan energía cuando se

"LA PAZ ES

fusionan. Pero liberan menor cantidad de energía por reacción de fusión que el hi-NUESTRA

PROFESIÓN"

drógeno. La fusión de elementos todavía más pesados se produce en las etapas más avanzadas de la evolución de una estrella. La energía liberada por gramo durante las diversas etapas de fusión del helio al hierro representa sólo alrededor de una cuarta parte de la energía liberada en la fusión del hidrógeno al helio.

Antes del desarrollo de la bomba atómica (bomba de fisión), las temperaturas re-Hidruro

queridas para superar la repulsión mutua de los protones e iniciar la fusión nuclear en de litio

la Tierra eran inalcanzables.12 Pero la explosión de una bomba atómica genera tempe-

“Disparadores”

raturas considerablemente más altas que las del centro del Sol, lo que abre la puerta a de la bomba

una bomba termonuclear. La primera explosión termonuclear tuvo lugar en 1952 y fue atómica

?

seguida por las “bombas H” en 1954. Mientras que la masa crítica del material fisionable limita el tamaño de una bomba de fisión (bomba atómica), en una bomba de fusión no se impone tal límite. Así como no existe límite para el tamaño de un depósito para el almacenamiento de petróleo, teóricamente no existe límite para el tamaño de una bomba de fusión. Al igual que con el petróleo en un depósito de almacenamiento, F I G U R A 3 4 . 2 2

cualquier cantidad de combustible de fusión puede almacenarse con seguridad hasta Bombas de fisión y de fusión.

que se enciende. Aunque un simple fósforo puede encender un depósito de petróleo, nada menos energético que una bomba de fisión puede encender una bomba termonuclear. Puedes ver que no existe una cosa como una bomba de hidrógeno “bebé”. No puede ser menos energética que su detonador, que es una bomba de fisión.

La bomba de hidrógeno es otro ejemplo de un descubrimiento aplicado a propósitos destructivos más que constructivos. El potencial lado constructivo del cuadro es la liberación controlada de enormes cantidades de energía limpia.

11Una de las reacciones en el ciclo de fusión protón-protón del Sol sí tiene un estado final de una partícula. Es protón 1 deuterón → He-3. Esto ocurre porque la densidad en el centro del Sol es suficientemente grande como para que las partículas “espectador” compartan la liberación de energía. De modo que, incluso en este caso, la energía liberada pasa a dos o más partículas. La fusión en el Sol involucra reacciones más complicadas (¡y más lentas!) en las que una pequeña parte de la energía también aparece en forma de rayos gamma y neutrinos. Los neutrinos escapan sin obstáculos desde el centro del Sol y bañan el sistema solar. De forma interesante, la fusión de los núcleos en el Sol es un proceso ocasional porque el

espaciamiento medio entre los núcleos es enorme, incluso a las altas presiones en su centro. Es por ello que el Sol tardará unos 10 mil millones de años en consumir su combustible hidrógeno.

12Sin embargo, en los aceleradores de partículas pueden crearse reacciones de fusión a pequeña escala.

F ÍSI C A S ATÓ M I C A Y N U CL E A R

P U N T O D E C O N T R O L

1. Primero se afirmó que la energía nuclear se liberaba cuando los átomos se dividían. Ahora se afirma que la energía nuclear se libera cuando los átomos se combinan. ¿Esto es una contradicción? ¿Cómo puede liberarse energía mediante procesos opuestos?

2. Para obtener energía del elemento hierro, ¿los núcleos de hierro deberían fisionarse o fusionarse?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. La energía se libera en cualquier reacción nuclear en la cual la masa de los núcleos después de la reacción sea menor que la masa de los núcleos antes de ésta. Cuando los núcleos ligeros, como los del hidrógeno, se fusionan para formar núcleos más pesados, la masa nuclear total disminuye. Por tanto, la fusión de núcleos lige-La energía liberada en la fusión

ros libera energía. Cuando los núcleos pesados, como los del uranio, se dividen de un par de núcleos de hidrógeno

para convertirse en núcleos más ligeros, la masa nuclear total también disminuye.

es menor que en la fisión de un

Por tanto, la división de los núcleos pesados libera energía. Para liberar energía, núcleo de uranio. Pero, debido

todo se trata de "disminuir la masa", sin importar que esto sea químico o nuclear.

a que existen más átomos en

un gramo de hidrógeno que en un

2. Ninguno, porque el hierro está en el mismo fondo de la curva (valle de energía).

gramo de uranio, gramo por gra-

Si fusionas dos núcleos de hierro, el producto se encuentra en alguna parte sobre mo, la fusión de hidrógeno libera

la curva arriba y a la derecha del hierro, lo que significa que el producto tiene varias veces más energía que la

mayor masa por nucleón. Si divides un núcleo de hierro, los productos se encuen-fisión del uranio.

tran sobre la curva arriba y a la izquierda del hierro, lo que nuevamente significa una mayor masa por nucleón. Puesto que en ninguna reacción ocurre una reducción de masa, jamás se libera energía.

34.7 Cómo controlar la fusión

El combustible para la fusión nuclear es el hidrógeno, el elemento más abundante en el Universo. La reacción que funciona mejor a una temperatura "moderada" es la fusión de los isótopos de hidrógeno deuterio (2H) y tritio (3H). El deuterio se encuentra en 1

1

el agua ordinaria. El deuterio en los océanos del mundo tiene el potencial de liberar SCREENCAST: Fusión controlada

muchísima más energía que todos los combustibles fósiles del mundo y mucho más que el suministro de uranio del mundo. El tritio, que tiene una vida media de 12 años, está casi por completo ausente de la naturaleza, pero puede crearse al hacer reaccionar deuterones (como en la Figura 34.21) o en una reacción que involucre al litio.

Por tanto, la fusión es una fuente de ensueño para satisfacer las necesidades de energía a largo plazo. Sin embargo, el pronóstico para la energía de fusión en el futuro previsible es desalentador. Se han probado varios esquemas de fusión. El primero de los enfoques, que todavía se persigue, involucra el confinamiento de un plasma caliente con un campo magnético. Otros enfoques han aprovechado láseres de alta energía. Un Las reacciones de fusión pueden

plan es soltar municiones de hidrógeno en un fuego cruzado de láseres que encendería producir núcleos más grandes que

pulsos de energía de fusión. Los problemas, después de muchos años de esfuerzos, han los del hierro; de otro modo, ningún elemento más allá del hierro

sido abrumadores. Todos los escenarios han buscado un "punto de equilibrio energé-existiría en la tabla periódica. Pero

tico", en donde la salida de energía sea al menos igual a la entrada de energía. Excepto dichas reacciones de fusión no

por breves rachas, esto no ha ocurrido.

producen energía. La consumen y

¿Habrá algún avance, en el que la salida sostenida de energía en un dispositivo la convierten en masa, como ocu-será mayor que la entrada de energía para iniciar y sostener la fusión? ¿Se encontrará rre en las supernovas. Todos los

elementos en tu cuerpo, excepto

una forma de dominar la energía del Sol y las estrellas? No se sabe. Cuando eso suceda, el hidrógeno, probablemente se

los humanos podrán sintetizar sus propios elementos y producir energía en el proceso, formaron en las estrellas. ¡Piensa

como siempre han hecho las estrellas. En ese momento, la fusión probablemente sería la que tu ser amado es polvo de

principal fuente de energía para las generaciones por venir. Sigue consultando Internet, estrellas!

y por el momento agradece que la fusión termonuclear en la estrella más cercana sea responsable de la luz y de todo el brillo que brinda a la Tierra.

C A PÍ T U LO 3 4 R E V ISI Ó N

653

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)
Fisión nuclear. La división del núcleo de un átomo pesado,

Reactor reproductor. Reactor de fisión que está diseñado para como el uranio-235, en dos núcleos más pequeños, acom-reproducir más combustible fisionable del que se le pone al

pañada con la liberación de mucha energía.

convertir isótopos no fisionables en isótopos fisionables.

Reacción en cadena. Reacción autosostenida en la que los pro-

Fusión nuclear. Combinación de núcleos atómicos ligeros para
ductos de un evento de la reacción estimulan más eventos

formar núcleos más pesados, por lo general con la liberación

de la reacción.

de mucha energía.

Masa crítica. Mínima cantidad de masa de material fisiona -

Fusión termonuclear. Fusión nuclear producida por una tem-

ble en un reactor o bomba nuclear que sostendrá una reac-

peratura alta.

ción en cadena.

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N) 34.1 Fisión nuclear

17. Cita tres ventajas principales de la energía de fisión. Cita

1. ¿Por qué una reacción en cadena usualmente no ocurre en

cuatro inconvenientes importantes.

las minas de uranio?

34.5 Equivalencia masa-energía

2. ¿Por qué una reacción en cadena es más probable que

ocurra en un gran trozo de uranio que en uno pequeño?

18. ¿Qué celebrada ecuación muestra la equivalencia entre la

3. ¿Qué se entiende por la idea de masa crítica?

masa y la energía?

4. ¿Cuál soltará más neutrones: dos trozos separados de

19. ¿Para sacar un nucleón de un núcleo atómico se requiere

uranio o los mismos trozos juntos?

trabajo? ¿El nucleón, una vez afuera, tiene más energía de

la que tenía cuando estaba adentro del núcleo? ¿En qué

5. ¿Cuáles fueron los dos métodos usados en el Proyecto

forma está dicha energía?

Manhattan, durante la Segunda Guerra Mundial, para

separar el U-235 del U-238?

20. ¿Qué iones, con la misma carga y rapidez, se desvían

menos en un espectrómetro de masas?

34.2 Reactores de fisión nuclear

21. ¿Cuál es la diferencia básica entre las gráficas de las

6. ¿Cuáles son los tres posibles destinos de los neutrones en

Figuras 34.15 y 34.16?

el metal uranio?

22. ¿En cuál elemento la masa por nucleón es mayor?

7. ¿Cuáles son los cuatro principales componentes de un

¿Menor?

reactor de fisión?

23. ¿Cómo se compara la masa por nucleón en el uranio, con

8. ¿Qué componentes son los salvaguardas para evitar que

la masa por nucleón en sus fragmentos de fisión?

un reactor genere energía fuera de control?

24. ¿En qué se convierte la masa por nucleón "perdida" en las

9. ¿Qué isótopo se produce cuando el U-238 absorbe un

reacciones de fisión y de fusión?

neutrón?

25. Si la gráfica de la Figura 34.16 se ve como un valle de

10. ¿Qué isótopo se produce cuando el U-239 emite una

energía, ¿qué puedes decir acerca de la energía de las

partícula beta?

transformaciones nucleares que avanzan hacia el hierro?

11. ¿Qué isótopo se produce cuando el Np-239 emite una

34.6 Fusión nuclear

partícula beta?

12. ¿Qué tienen en común el U-235 y el Pu-239?

26. Cuando un par de núcleos de hidrógeno se fusionan para

crear helio, ¿cómo se compara la masa del núcleo de helio

34.3 El reactor reproductor

resultante, con la suma de las masas nucleares antes de la

13. ¿Cuál es el efecto de colocar pequeñas cantidades de

fusión?

isótopos fisionables con grandes cantidades de U-238?

27. Para que el helio libere energía, ¿debe fisionarse o fusionarse?

14. Menciona dos isótopos que experimentan fisión nuclear.

34.7 Cómo controlar la fusión

15. ¿Qué elemento reacciona en un reactor reproductor para

reproducir combustible nuclear?

28. ¿Qué isótopos del hidrógeno se fusionan mejor a tempe-

raturas “moderadas”?

34.4 Energía eléctrica mediante fisión

29. ¿Cuál isótopo del hidrógeno, deuterio o tritio es abun-

16. ¿En qué forma un reactor nuclear es similar a una planta

dante y cuál es escaso?

convencional de combustible fósil?

30. ¿Qué tipo de energía nuclear es responsable de la luz solar?

654

PA R T E S I E T E

F ÍSI C A S ATÓ M I C A Y N U CL E A R

P I E N S A Y R E A L I Z A (A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 31. Escribe una carta al abuelo o a la abuela y háblales de

tanto los pros como los contras de las plantas eléctricas

la energía nuclear. Explica por qué las minas de uranio

de fisión nuclear y explica cómo la comparación afecta

podrían cerrarse si el plutonio de las actuales cabezas

tu visión personal de los reactores nucleares. Explica

nucleares en el mundo se desmantelara y usara como

también cómo difieren la fisión y la fusión nucleares.

combustible de fisión para reactores eléctricos. Cita

P I E N S A Y R E S U E L V E (A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) 32. El kilotón, que se usa para medir la energía liberada

un núcleo del isótopo de hidrógeno más pesado, el tritio.

en una explosión atómica, es igual a 4.2 3 1012 J

¿Cuál es el otro producto de esta reacción? ¿Cuál de estos

(aproximadamente la energía liberada en la explosión de

dos productos alimenta la reacción explosiva?

1,000 toneladas de TNT). Al recordar que 1 kilocaloría

34. Una importante reacción de fusión tanto en las bombas de

de energía eleva la temperatura de 1 kg de agua en 1°C

hidrógeno como en los reactores de fusión controlada es la

y que 4,184 joules es igual a 1 kilocaloría, demuestra

"reacción DT", en la cual un deuterón y un tritón (núcleos

que la energía liberada por una bomba de 20 kilotones

de isótopos de hidrógeno pesado) se combinan para formar

es suficiente para calentar 4.0 3 108 kilogramos de agua

una partícula alfa y un neutrón con la liberación de mucha

(casi la mitad de un millón de toneladas) hasta 50°C.

energía. Usa la conservación de la cantidad de movimiento

33. El isótopo de litio usado en una bomba de hidrógeno es el

para explicar por qué el neutrón que resulta de esta reac-

Li-6, cuyo núcleo contiene tres protones y tres neutrones.

ción recibe aproximadamente 80% de la energía, mientras

Cuando un núcleo de Li-6 absorbe un neutrón, se produce

que la partícula alfa obtiene sólo alrededor de 20%.

P I E N S A Y C L A S I F I C A (A N Á L I S I S)

35. Supón que todos los siguientes núcleos experimentan

36. Clasifica, de mayor a menor, la reducción de la masa

fisión en un par de fragmentos de masas iguales o casi

por nucleón que acompaña a la fusión de los siguientes

iguales. Con la tabla periódica y la Figura 34.16 como

pares de núcleos:

guías, clasifica, de mayor a menor, la reducción en la masa

a. Dos núcleos de hidrógeno

por nucleón para estos núcleos después de la fisión.

b. Dos núcleos de carbono

a. Uranio

c. Oro

c. Dos núcleos de aluminio

b. Plata

d. Hierro

d. Dos núcleos de hierro

P I E N S A Y E X P L I C A (S Í N T E S I S)

37. ¿Las plantas eléctricas nucleares de hoy en día usan fisión,

45. El U-235 libera un promedio de 2.5 neutrones por fisión,

fusión o ambas?

mientras que Pu-239 libera un promedio de 2.7 neutro-

38. ¿Por qué la mena de uranio no experimenta espontánea-

nes por fisión. En consecuencia, ¿cuál de estos elementos

mente una reacción en cadena?

puedes esperar que tenga la menor masa crítica?

39. Algunos núcleos pesados, que contienen incluso más pro-

46. El uranio y el torio abundan en varios depósitos minera-

tones que el núcleo de uranio, experimentan una "fisión

les. Sin embargo, el plutonio podría existir sólo en canti-

espontánea" y se dividen sin absorber un neutrón. ¿Por

dades excesivamente pequeñas en tales depósitos. ¿Cuál

qué la fisión espontánea sólo se observa en los núcleos

es tu explicación?

más pesados?

47. ¿Por qué, después de que una barra de combustible de

40. ¿Por qué un neutrón es una mejor bala nuclear que un

uranio llega al final de su ciclo de combustible (usual-

protón?

mente 3 años), la mayoría de su energía proviene de la

41. ¿Por qué el escape de neutrones será proporcionalmente

fisión de plutonio?

menor en un trozo grande de material fisionable que en

48. Si un núcleo de 232Th absorbe un neutrón y el núcleo

un trozo pequeño?

resultante experimenta dos decaimientos beta sucesivos

42. Una esfera de 56 kg de U-235 constituye una masa crí-

(que emiten electrones), ¿qué núcleo resulta?

tica. Si la esfera se aplana en una forma de panqueque,

49. El agua que pasa a través del núcleo del reactor de un

¿todavía sería crítica? Explica.

reactor de fisión moderado con agua no pasa hacia la tur-

43. ¿Cuál forma es probable que necesite más material para

bina. En vez de ello, el calor se transfiere hacia un ciclo

una masa crítica: un cubo o una esfera? Explica.

de agua separado que está completamente afuera del reac-

44. ¿La distancia promedio que recorre un neutrón a través

tor. ¿Por qué se hace esto?

de un material fisionable antes de escapar aumenta o

50. ¿Por qué el carbono es mejor que el plomo como modera-

disminuye cuando dos trozos de material fisionable se

dor en los reactores nucleares?

ensamblan en una pieza? ¿Este ensamble aumenta o dis-

51. ¿La masa de un núcleo atómico es mayor o menor que

minuye la probabilidad de una explosión?

la suma de las masas de los nucleones separados que lo

C A PÍ T U LO 3 4 R E V ISI Ó N

655

componen? ¿Por qué las masas de los nucleones no suman

59. ¿Por qué, a diferencia del combustible de fisión, no hay

la masa nuclear total?

límite para la cantidad de combustible de fusión que

52. La liberación de energía de la fisión nuclear está ligada al

puede almacenarse de manera segura en una localidad?

hecho de que los núcleos más pesados tienen alrededor

60. Si una reacción de fusión no produce isótopos radiactivos

de 0.1% más masa por nucleón que los núcleos cerca del
considerables, ¿por qué una bomba de hidrógeno produce
medio de la tabla periódica de los elementos. ¿Cuál sería
significativos efectos radiactivos colaterales?
el efecto sobre la liberación de energía si la cifra, en lugar
61. Menciona al menos dos de las principales ventajas potencia-
de 0.1%, fuera de 1%?
les de la producción de energía eléctrica mediante fusión en
53. ¿En qué forma son similares las reacciones de fisión y
lugar de la producción de energía eléctrica mediante fisión.
fusión? ¿Cuáles son las principales diferencias entre estas
62. Al hidrógeno ordinario en ocasiones se le llama el combus-
reacciones?
tible perfecto porque, cuando se quema, el producto de la
54. ¿Cómo es que la quema química es similar a la fusión
combustión es agua inofensiva. De este modo, ¿por qué no
nuclear?
se abandonan las energías de fisión y fusión, por no mencio-
55. Mezclar átomos de cobre y cinc produce la aleación lla-
nar la energía de combustible fósil, y sólo se usa hidrógeno?
mada latón. ¿Qué se produciría con la fusión de núcleos
63. Si un núcleo de U-238 se divide en dos piezas iguales,
de cobre y cinc?
y cada pieza emite una partícula alfa, ¿qué elementos se

56. Los átomos de oxígeno e hidrógeno se combinan para

producen?

formar agua. Si los tres núcleos en una molécula de agua

64. La energía de fisión principalmente está en la energía

se fusionaran, ¿qué elemento se produciría?

cinética de sus productos. ¿En qué se convierte esta ener-

57. Si un par de átomos de carbono se fusionaran, y el

gía en un reactor comercial?

producto emitiera una partícula beta, ¿qué elemento se

65. El reactor original de Fermi "apenas" era crítico porque el

produciría?

uranio natural que usó contenía menos de 1% del isótopo

58. ¿Cuál produce más energía: la fisión de un solo núcleo de

fisionable U-235 (vida media: 713 mil ones de años). ¿Y si,

uranio o la fusión de un par de núcleos de deuterio? ¿La

en 1942, la Tierra hubiese tenido una edad de 9 mil mil ones

fisión de un gramo de uranio o la fusión de un gramo de

de años, en lugar de 4.5 mil mil ones? ¿Fermi habría podido

deuterio? (¿Por qué difieren tus respuestas?)

hacer que un reactor fuera crítico con el uranio natural?

P I E N S A Y D I S C U T E (E V A L U A C I Ó N)

66. ¿Por qué probablemente la fisión nuclear no se usará

74. Los "imanes de hidrógeno" de la Figura 34.20 pesan más

directamente para impulsar automóviles? ¿Cómo podría

cuando están separados que cuando se combinan. ¿Cuál sería
usarse de manera indirecta para impulsar automóviles?
la diferencia básica si el ejemplo ficticio consistiera de "ima-
67. Para predecir la liberación de energía aproximada
nes nucleares" que fueran la mitad de pesados que el uranio?
de una reacción de fisión o de una reacción de fusión,
75. En una reacción de fisión nuclear, ¿cuál tiene más masa:
explica cómo un físico utiliza la curva de la Figura 34.16
el uranio inicial o sus productos?
o una tabla de masas nucleares y la ecuación E 5 mc 2.
76. En una reacción de fusión nuclear, ¿cuál tiene más masa: los
68. ¿Qué núcleos resultarán si un núcleo de U-235, después de
isótopos de hidrógeno iniciales o los productos de la fusión?
absorber un neutrón y convertirse en U-236, se divide en
77. La fusión nuclear sostenida todavía no se logra y sigue
dos fragmentos idénticos?
siendo una promesa de abundante energía futura. Sin
69. Los núcleos pesados pueden fusionarse, por ejemplo,
embargo, la energía que siempre ha sostenido a la huma-
al disparar un núcleo de oro hacia otro idéntico. ¿Tal
nidad ha sido la energía de la fusión nuclear. Explica.
proceso produce energía o cuesta energía? Explica.
78. Explica cómo el decaimiento radiactivo siempre ha calen-
70. Los núcleos ligeros pueden dividirse. Por ejemplo, un

tado la Tierra desde el interior y cómo la fusión nuclear

deuterón, que es una combinación protón-neutrón, puede

siempre ha calentado la Tierra desde el exterior.

dividirse en un protón separado y un neutrón separado.

79. El mundo no ha sido el mismo desde el descubrimiento

¿Tal proceso produce energía o cuesta energía? Explica.

de la inducción electromagnética y sus aplicaciones a los

71. ¿Cuál proceso liberaría energía del oro: la fisión o la

motores y los generadores eléctricos. Especula y menciona

fusión? ¿Cuál liberaría energía del carbono? ¿Del hierro?

algunos de los cambios mundiales que es probable que

72. Si el uranio se dividiera en tres segmentos de igual tamaño,

sigan a la llegada de exitosos reactores de fusión.

en lugar de dos, ¿se liberaría más energía o menos energía?

80. Discute, y realiza una comparación de la contaminación

Defiende tu respuesta con base en la Figura 34.16.

producida por las plantas eléctricas convencionales de

73. Supón que la curva de la Figura 34.16 para la masa por

combustible fósil y las de fisión nuclear. Considera las con-

nucleón frente al número atómico tuviera la forma de

taminaciones térmica, química y radiactiva.

la curva en la Figura 34.15. Entonces, ¿las reacciones

81. El U-235 tiene una vida media de aproximadamente

de fisión nuclear producirían energía? ¿Las reacciones de

700 millones de años. ¿Qué te dice esto acerca de la pro-

fusión nuclear producirían energía? Defiende tus

babilidad de la existencia de energía de fisión en la Tierra

respuestas.

dentro de mil millones de años?

656

PA R T E S I E T E

F ÍSI C A S ATÓ M I C A Y N U CL E A R

P A R T E S I E T E Examen de práctica de opción múltiple

Elige la MEJOR respuesta a cada una de las siguientes:

17. Cierto elemento emite 1 partícula alfa y sus productos entonces

emiten 2 partículas beta en sucesión. El número atómico del

1. Los neutrones en un átomo usualmente se encuentran

elemento resultante cambia en

(a) dentro del núcleo.

(c) Cualquiera de los anteriores.

(a) cero.

(c) menos 2.

(b) afuera del núcleo.

(d) Ninguno de los anteriores.

(b) menos 1.

(d) más 1.

2. Las líneas espectrales de los elementos

18. Cuando un núcleo de uranio-238 emite una partícula alfa, lo

(a) son caóticas.

(c) están ubicadas por su amplitud.

que queda es

(b) son ordenadas.

(d) están en fase.

(a) torio-242.

(c) torio-234.

3. La energía de un fotón emitido se relaciona con su

(b) torio-238.

(d) radio-214.

(a) frecuencia.

(c) amplitud.

19. Cuando un protón se quita de un núcleo atómico, el átomo

(b) polarización.

(d) dirección.

tiene una reducción en

4. Las órbitas discretas de los electrones se entienden mejor cuan-

(a) carga.

(c) masa.

do se modelan como

(b) energía.

(d) Todos los anteriores.

(a) partículas de gran rapidez. (c) ondas.

20. Cuando piezas pequeñas de material se ensamblan en una pieza

(b) partículas sobre resortes.

(d) fotones.

más grande, el área superficial combinada

5. A partir de la mecánica cuántica se aprende que un núcleo

(a) aumenta enormemente. (c) disminuye.

radiactivo está gobernado por

(b) aumenta ligeramente. (d) no cambia.

(a) las leyes de Newton.

(c) la certeza.

21. Las reacciones en cadena en un reactor de fisión son causadas por (b) la probabilidad.

(d) ninguna ley en absoluto.

(a) energía cinética.

(c) conversión de masa.

6. La radiactividad ha estado en la Tierra desde

(b) conversión de energía. (d) neutrones expulsados.

(a) mediados del siglo XX. (c) la llegada de la tecnología médica.

22. Un reactor de fisión nuclear común

(b) la Revolución Industrial. (d) la formación de la Tierra.

(a) calienta agua.

7. ¿Cuál de éstos NO puede desviarse por medios eléctricos o

(b) genera electricidad directamente.

magnéticos?

(c) obtiene energía de la nada.

(a) Rayos alfa.

(c) Rayos gamma.

(d) es un gran contaminante de la atmósfera.

(b) Rayos beta.

(d) Todos ellos.

23. Comparadas con la masa de un átomo de uranio que experi-

8. ¿Cuál tipo de radiación proveniente de fuentes cósmicas predomina

menta fisión, las masas combinadas de los productos después de

en el interior de los aviones comerciales que vuelan a gran altitud?

la fisión son

(a) Alfa.

(c) Gamma.

(a) menos.

(c) las mismas.

(b) Beta.

(d) Ninguno de los anteriores.

(b) más.

(d) cero.

9. En el núcleo atómico, las fuerzas eléctricas tienden a

24. Cuando se libera energía por el proceso de fusión, la masa total

(a) mantener unidas las partículas. (c) producir movimiento orbital.

del material después del evento es

(b) separar a las partículas.

(d) cargar partículas.

(a) menos.

(c) más.

10. Cuando los alimentos se exponen a radiación gamma, los alimentos

(b) la misma.

(d) cero.

(a) se vuelven ligeramente radiactivos.

25. ¿Cuál proceso liberaría energía del oro: la fisión o la fusión?

(b) no se vuelven radiactivos.

¿Del carbono?

(c) se echarán a perder más rápido.

(a) Oro: fisión; carbono: fusión (c) Oro: fisión; carbono: fisión

(d) deben evitarse.

(b) Oro: fusión; carbono: fisión (d) Oro: fusión; carbono: fusión

11. La mayor parte de la radiación en la biosfera de la Tierra

26. Si un núcleo de hierro se divide en dos, sus fragmentos de fisión
(a) es radiación de fondo natural.

tendrían

(b) es resultado de actividades militares.

(a) menos masa por nucleón. (c) la misma masa por nucleón.

(c) proviene de plantas nucleares.

(b) más masa por nucleón. (d) o más o menos masa por nucleón.

(d) está en forma de rayos cósmicos.

27. ¿Cuál de estos tres elementos tiene más masa por nucleón?

12. El carbono-14 se produce principalmente por radiación cósmica en

(a) Hidrógeno

(c) Uranio

(a) la atmósfera.

(b) Hierro

(d) La misma en cada uno

(b) los alimentos que ingieres.

28. Tanto en la fisión como en la fusión, la energía se libera mien-

(c) el interior de la Tierra.

tras la masa

(d) efectos colaterales de las pruebas con bombas nucleares.

(a) disminuye.

13. Una muestra radiactiva tiene una vida media de 1 hora. Si comienzas (b) permanece invariable; se conserva.

con 1.000 gramo de el a a mediodía, ¿cuánto te quedará a las 3:00 p.m.?

(c) aumenta.

(a) 0.50 g

(c) 0.125 g

(d) puede disminuir o aumentar.

(b) 0.25 g

(d) 0.0625 g

29. En un evento de fisión o en un evento de fusión, una cantidad

14. Cuando un elemento expulsa una partícula alfa, el número de

que permanece invariable es

masa del elemento resultante

(a) la energía cinética.

(c) el número de nucleones.

(a) se reduce en 2.

(c) aumenta en 2.

(b) la masa.

(d) el enlace de nucleones.

(b) se reduce en 4.

(d) aumenta en 4.

30. La ecuación que subyace más a la liberación de energía en un

15. Cuando un elemento expulsa una partícula alfa, el número ató-

evento nuclear es

mico del elemento resultante

(a) E 5 hf.

(c) E 5 Fd.

(a) se reduce en 2.

(c) aumenta en 2.

(b) E 5 1/2 mv 2.

(d) E 5 mc 2.

(b) se reduce en 4.

(d) aumenta en 4.

16. Cuando un elemento expulsa una partícula beta, el número

Después de hacer elecciones razonadas y discutirlas con tus amigos, atómico de dicho elemento

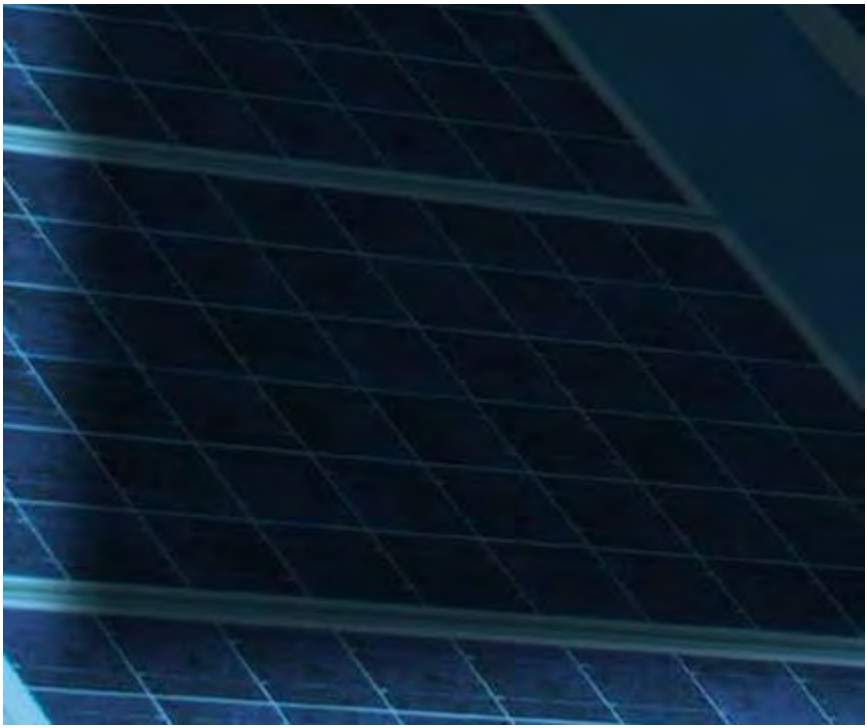
encuentra las respuestas en la página S-1.

(a) se reduce en 1.

(c) se reduce en 2.

(b) aumenta en 1.

(d) aumenta en 2.

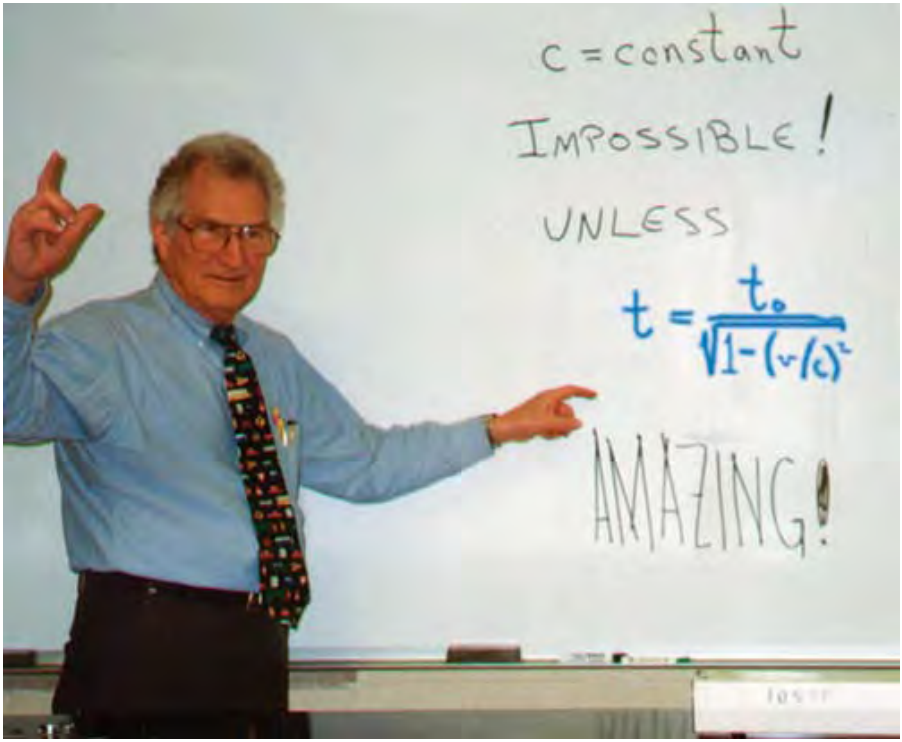


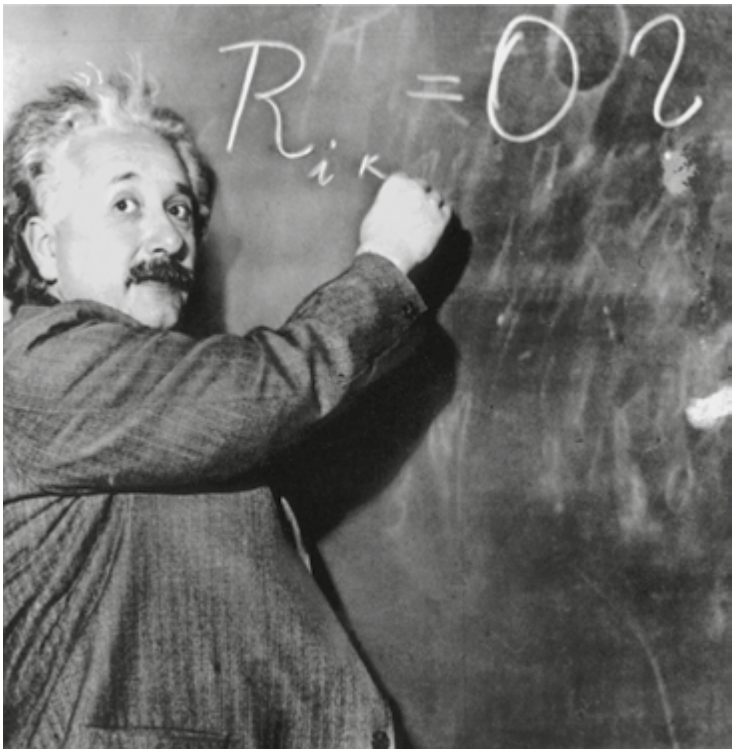
P A R T E O C H O

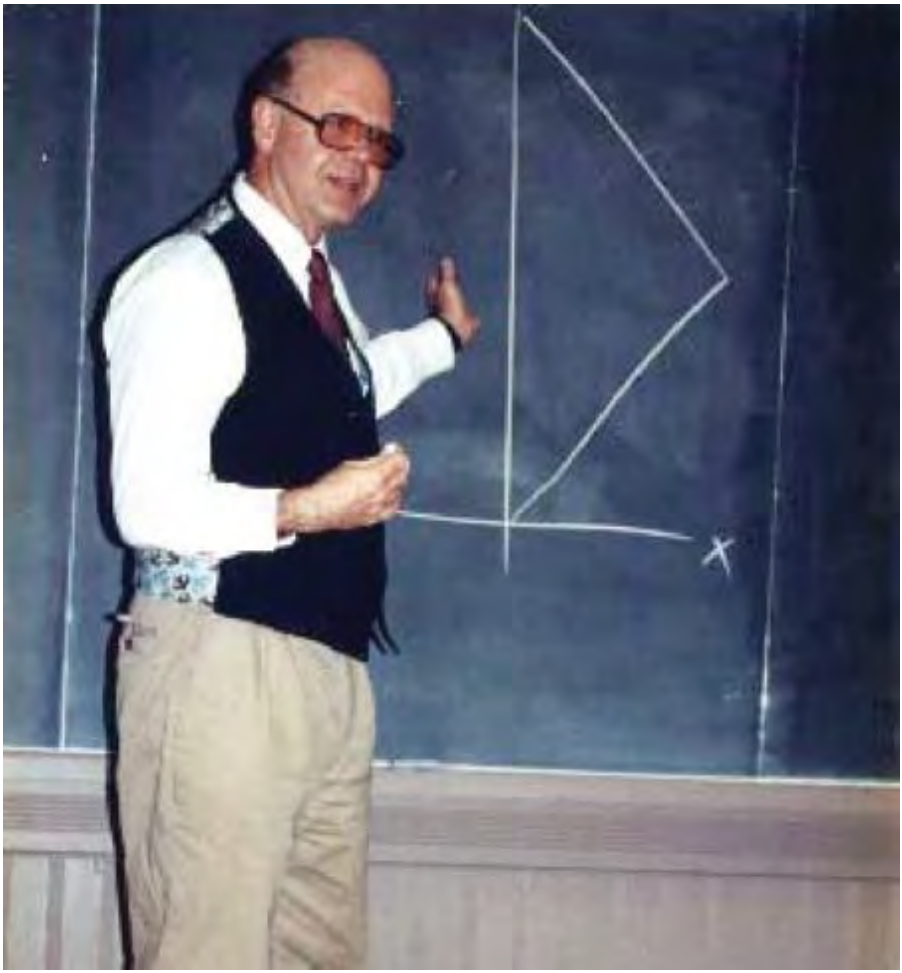
Relatividad

Antes de la llegada de la relatividad especial, las personas pensaban que las estrel as estaban fuera del alcance de los seres humanos. Pero la distancia es relativa: depende del movimiento. En un marco de referencia que se mueve casi tan rápido como la luz, ¡la distancia se contrae y el tiempo se estira lo suficiente como para permitir a los futuros astronautas acceder a las estrel as y más allá! Somos como el pol ito de Evan de la página 1 con la que inicia el libro, a punto de un nuevo comienzo. La física de Newton nos llevó a

la Luna; la física de Einstein nos dirige a las estrel as. ¡Vives en una época muy emocionante!




$R_{ik} = 0$



35 1

C A P Í T U L O 3 5

Teoría de la

relatividad

2

especial

35.1 El movimiento es relativo

35.2 Postulados de la teoría de la relatividad

especial

35.3 Simultaneidad

3

35.4 El espacio-tiempo y la dilatación del tiempo

3

35.5 Suma de velocidades

35.6 Contracción de la longitud

35.7 Cantidad de movimiento relativista

35.8 Masa, energía y E 5 mc 2

35.9 Principio de correspondencia

1 El eminente físico Ken Ford en sus años de retiro ofrece asesorías a estudiantes de bachillerato y siempre subraya y comunica la

belleza que observa en la física. 2 El más grande científico del siglo XX y uno de sus seres humanos favoritos.

3 Edwin F. Taylor, coautor de varios libros de relatividad, señala un diagrama que muestra dos trayectorias entre un punto de partida y el cruce de la línea final. Una trayectoria es recta, una de ida y vuelta. El gemelo que viaja de ida y vuelta regresa a casa más joven que el gemelo perezoso que se quedó en casa, un resultado sorprendente que muestra la idea esencial de Einstein de que el tiempo

entre dos eventos depende de la trayectoria tomada entre ellos.

C A PÍ T U LO 35 T EO R Í A D E L A R EL AT I V I DA D ESP ECI A L

659

En un célebre artículo de 1905 titulado "De la electrodi-

námica de los cuerpos en movimiento", escrito cuando tenía

A lbert Einstein nació en Ulm, Alemania, el 14 de marzo

de 1879. De acuerdo con la leyenda popular, fue un

niño lento y aprendió a hablar a una edad mucho 26 años, Einstein demostró que las leyes de Maxwell pueden, mayor que el promedio; sus padres temieron durante un tiem-después de todo, igual que las leyes de Newton, interpretarse

po que pudiera tener retraso mental. Sin embargo, sus registros como independientes del estado de movimiento de un obser-

de la escuela primaria muestran que tenía un talento notable vador, ¡pero con un costo! El costo de lograr esta visión unifi-

para las matemáticas, la física y para tocar el violín. Sin embar-cada de las leyes de la naturaleza es una revolución total en la

go, se rebeló ante la enseñanza practicada con una disciplina manera de entender el espacio y el tiempo.

estricta y de memorización y fue expulsado justo cuando se pre-

Einstein demostró que, tal como las fuerzas entre las cargas paraba para abandonar la escuela a la edad de 15 años. Princi-

eléctricas son afectadas por el movimiento, las mismísimas palmente por razones de negocios, su familia se mudó a Italia. El

mediciones del espacio y del tiempo también son afectadas joven Einstein renunció a su ciudadanía alemana y se fue a vivir

por el movimiento. Todas las mediciones del espacio y el con amigos de la familia en Suiza. Ahí, con dos años menos

tiempo dependen del movimiento relativo. Por ejemplo, la que la edad habitual, fue aceptado para presentar el examen de

longitud de una nave espacial colocada sobre su plataforma admisión al renombrado Instituto Federal Sueco de Tecnología

de lanzamiento y el tictac de los relojes en su interior cam-

en Zurich. Pero, debido a dificultades con la lengua francesa,

bian cuando la nave espacial se pone en movimiento a gran

no aprobó el examen. Pasó un año en un bachil erato suizo en

rapidez. Siempre ha sido una noción de sentido común que,

Aarau, donde fue "promovido con protesta en francés". Presentó

cuando te mueves, cambias de posición en el espacio, pero

de nuevo el examen de admisión en Zurich y lo aprobó.

Einstein no prestó atención al sentido común y afirmó que,

Como joven y entusiasta estudiante de física en la década de

en el movimiento, también cambiamos el ritmo de avance

1890, a Einstein le inquietaba una diferencia entre las leyes hacia el futuro: el propio tiempo se altera. Einstein fue más de la mecánica de Newton y las leyes del electromagnetismo de

al á y demostró que una consecuencia de la relación entre

Maxwel . Las leyes de Newton eran independientes del esta -

espacio y tiempo es una relación entre masa y energía, dada

do de movimiento de un observador; las leyes de Maxwell no

por la famosa ecuación $E = mc^2$.

lo eran, o así parecía. Alguien en reposo y alguien en movi-

Éstas son las ideas que componen este capítulo, las ideas

miento encontrarían que las mismas leyes de la mecánica se de la relatividad especial, ideas tan remotas a tu experiencia aplicaban a un objeto en movimiento bajo estudio, pero des-cotidiana que comprenderlas exige un esfuerzo de tu mente.

cubrirían que leyes diferentes de electricidad y magnetismo se Bastará con que te familiarices con estas ideas, de modo que

aplicaban a una carga en movimiento bajo estudio. Las leyes de

sé paciente contigo mismo si no las entiendes de inmedia-

Newton sugieren que no existe tal cosa como el movimiento

to. Tal vez en alguna era futura, cuando los viajes espaciales

absoluto; sólo importa el movimiento relativo. Pero las leyes de

interestelares a gran rapidez sean frecuentes, tus descendien-

Maxwell parecían sugerir que el movimiento es absoluto.

tes encuentren que la relatividad tiene sentido.

35.1 El movimiento es relativo

Recuerda del Capítulo 3 que, cada vez que se habla de movimiento, siempre debes especificar el lugar desde el cual se observa y mide el movimiento. Por ejemplo, una persona que camina por el pasillo de un tren en movimiento puede caminar con una rapidez de 1 kilómetro por hora con respecto a su asiento, pero a 60 kilómetros por hora con respecto a la estación del ferrocarril. Al lugar desde el cual se observa y mide el movimiento se le denomina marco de referencia. Un objeto puede tener diferentes velocidades con respecto a diferentes marcos de referencia.

Para medir la rapidez de un objeto, primero elige un marco de referencia e imagina que en dicho marco de referencia te quedas quieto. Luego, mide la rapidez con la que el objeto se mueve con respecto a ti; esto es, con respecto al marco de referencia. En el ejemplo anterior, si mides desde una posición de reposo en el interior del tren, la rapidez de la persona que camina es de 1 kilómetro por hora. Si mides desde una posición de reposo en el suelo, la rapidez de la persona que camina es de 60 kilómetros por hora. Pero el suelo en realidad no está quieto, porque la Tierra gira como un trompo en torno a su eje polar. Dependiendo de cuán cerca del ecuador esté el tren, la rapidez de la persona que camina puede ser de hasta 1,600 kilómetros por hora con respecto a un marco de referencia en el centro de la Tierra. Y el centro de la Tierra se mueve

con respecto al Sol. Si colocas el marco de referencia en el Sol, la rapidez de la persona que camina en el interior del tren, que está en la Tierra que orbita, es de casi 110,000

kilómetros por hora. Y el Sol no está en reposo: orbita el centro de la galaxia, que se mueve con respecto a otras galaxias.

El experimento de Michelson y Morley

¿Hay algún marco de referencia que esté quieto? ¿Acaso el propio espacio no está quieto y no se pueden hacer mediciones con respecto al espacio quieto? En 1887, los físicos estadounidenses A. A. Michelson y E. W. Morley, en un intento por responder estas preguntas, realizaron un experimento que se diseñó para medir el movimiento de la Tierra a través del espacio. Puesto que la luz viaja en ondas, se suponía entonces que algo vibraba en el espacio, algo misterioso llamado éter, que se pensaba que llenaba todo el espacio y funcionaba como un marco de referencia unido al espacio mismo. Estos físicos usaron un aparato muy sensible llamado interferómetro para hacer sus observaciones (Figura 35.1).

En este instrumento, un haz de luz proveniente de una fuente monocromática se separaba en dos haces con trayectorias en ángulo recto entre sí; estos haces se reflejaban y se recombinaban para demostrar si había alguna diferencia en la rapidez promedio sobre las dos trayectorias de ida y vuelta. El interferómetro se montó con una trayectoria paralela al movimiento de la Tierra en su órbita. Luego, Michelson o Morley observaban en forma cuidadosa en busca de cualquier cambio en la rapidez promedio a medida que el aparato giraba para poner la otra trayectoria paralela al movimiento de la Tierra. El interferómetro era lo suficiente sensible para medir la diferencia en los tiempos del viaje redondo de la luz que iba a favor y en contra de la velocidad orbital de la Tierra de 30 kilómetros por segundo y de ida y vuelta a través de la trayectoria de la Tierra por el espacio. Pero no observaron cambios. Ninguno. Algo estaba mal con la razonable idea de que la rapidez de la luz medida por un receptor en movimiento debía ser su rapidez habitual en un vacío, c, más o menos la aportación del movimiento de la fuente o receptor. Muchas repeticiones y variaciones del experimento de Michelson y Morley por muchos investigadores demostraron el mismo resultado nulo. Éste fue uno de los hechos desconcertantes de la física cuando comenzó el siglo XX.

F I G U R A 3 5 . 1

Fuente de luz

El interferómetro de Michelson y

Morley, que divide un haz de luz en dos

partes y luego las recombina para formar

un patrón de interferencia después de

Semiespejo

que recorrieron diferentes trayectorias.

Espejos

La rotación se logró en su experimento

cuando se puso a flote una masiva loza

Vidrio

de arenisca en mercurio. Este diagrama

transparente

esquemático muestra cómo el espejo

medio plateado divide el haz en dos

Telescopio

rayos. El vidrio transparente aseguró

que ambos rayos atravesaran la misma

cantidad de vidrio. En el experimento

Una interpretación del resultado desconcertante la sugirió el físico irlandés G. F.

real, los espejos se colocaron en cada

FitzGerald, quien propuso que la longitud del aparato experimental se encogía en la di-esquina para alargar las trayectorias.

rección en la que se movía sólo en la cantidad necesaria para contrarrestar la variación supuesta en la rapidez de la luz. El "factor

de encogimiento" necesario, 1 − v 2 / c 2, fue resuelto por el físico holandés Hendrik A. Lorentz. Este factor aritmético explica la discrepancia, pero ni FitzGerald ni Lorentz tenían una teoría adecuada de por qué esto era así. Es interesante que el mismo factor lo haya derivado Einstein en su artículo de 1905, donde demostró que era el factor de encogimiento del espacio mismo, no sólo de la materia en el espacio.

No está claro cuánto influyó en Einstein el experimento de Michelson y Morley, si es que acaso lo hizo. De cualquier manera, Einstein anticipó la idea de que la rapidez de la luz en el espacio libre es la misma en todos los marcos de referencia,

C A PÍ T U LO 35 T EO R Í A D E L A R EL AT I V I DA D ESP ECI A L

661

una idea que era contraria a las ideas clásicas del espacio y tiempo. La rapidez es una razón entre la distancia a través del espacio y un correspondiente intervalo de tiempo.

Para que la rapidez de la luz sea constante, debe descartarse la idea clásica de que el espacio y el tiempo son independientes entre sí. Einstein observó que el espacio y el tiempo estaban ligados, y, con postulados sencillos, construyó una profunda relación entre los dos.

35.2 Postulados de la teoría de la relatividad especial

Einstein no vio ninguna necesidad del éter. Junto con el éter estacionario también desa -

pareció la noción de un marco de referencia absoluto. Todo

movimiento es relativo, no con respecto a algún poste estacionario en el Universo, sino con respecto a marcos de referencia arbitrarios. Una nave espacial no puede medir su rapidez con respecto al SCREENCAST: Relatividad especial

espacio vacío, sino sólo con respecto a otros objetos. Si, por ejemplo, la nave espacial A rebasa a la nave espacial B en el espacio vacío, el hombre espacial A y la mujer espacial B observarán cada uno el movimiento relativo y, a partir de esta observación, ninguno de ellos podrá determinar quién se mueve y quien está en reposo.

Ésta es una experiencia familiar para el pasajero de un tren en una estación que mira por su ventana y observa que el tren de la vía contigua se mueve y pasa por su v

ventana. Está consciente sólo del movimiento relativo entre su tren y el otro tren, y no puede decir cuál tren se mueve. Él puede estar en reposo relativo con respecto al suelo y el otro tren puede estar en movimiento, o él puede estar en movimiento relativo con respecto al suelo y el otro tren puede estar en reposo, o ambos trenes pueden estar en movimiento relativo con respecto al suelo. Aquí lo importante es que, si estuvieras v

en un tren sin ventanas, no habría forma de determinar si el tren se mueve con velocidad invariable o está en reposo. Éste el primero de los postulados de Einstein de la teoría de la relatividad especial:

Todas las leyes de la naturaleza son las mismas en todos los marcos de referen-v

v

cia que se mueven de manera uniforme.

En un avión jet que viaja a 700 kilómetros por hora, por ejemplo, el café se vierte tal y como cuando el avión está en reposo; si balanceas un péndulo en el avión en movimiento, éste se balancea como si el avión estuviera en reposo sobre la pista. No hay un experimento físico que puedas realizar, ni siquiera con la luz, para determinar F I G U R A 3 5 . 2

el estado de movimiento uniforme. Las leyes de la física en el interior de la cabina que La medición de la rapidez de la luz es la se mueve de manera uniforme son las mismas que las que existen en un laboratorio misma en todos los marcos de referencia.

estacionario.

Se puede diseñar cualquier cantidad de experimentos para detectar el movimiento acelerado, pero ninguno, de acuerdo con Einstein, para detectar el movimiento uniforme. Por tanto, el movimiento absoluto no tiene ningún significado. Sería muy extraño que las leyes de la mecánica variaran para los observadores que se mueven con diferentes rapideces. Ello significaría, por ejemplo, que un jugador de pool sobre un trasatlántico que se mueve con suavidad tendría que ajustar su estilo de juego a la rapidez del navío, o incluso a la temporada, ya que la Tierra varía su rapidez orbital en torno al Sol. La experiencia común es que no es necesario tal ajuste. Y, de acuerdo con Einstein, esta misma insensibilidad al movimiento se extiende al electromagnetismo. Ningún experimento, mecánico o eléctrico u óptico, ha revelado jamás movimiento absoluto. Esto es lo que significa el primer postulado de la relatividad.

Una de las preguntas que Einstein se planteó cuando era joven fue: ¿cómo se vería un haz de luz si viajaras junto a él? De acuerdo con la física clásica, el haz estaría en reposo para tal observador. Mientras más pensaba Einstein en esto, más se convencía

de que uno no podría moverse con un haz de luz. Por último llegó a la conclusión de $v = c$

que, sin importar cuán rápidos dos observadores pudieran moverse uno con respecto c

al otro, cada uno de ellos mediría la rapidez de un haz de luz que pasara junto a ellos en 300,000 kilómetros por segundo. Éste fue el segundo postulado de su teoría de la relatividad especial:

La rapidez de la luz en el espacio libre tiene el mismo valor medido para todos los observadores, sin importar el movimiento de la fuente o el movimiento del observador; esto es: la rapidez de la luz es una constante.

F I G U R A 3 5 . 3

La rapidez de un destello de luz emitido

Para ilustrar este enunciado, considera una nave espacial que parte desde la estación por la estación espacial se mide en c por

espacial que se muestra en la Figura 35.3. Un destello de luz, que viaja a 300,000 km/s, observadores tanto en la estación espa-o c, se emite desde la estación. Sin importar la velocidad de la nave, un observador que cial como en la nave espacial.

viaja en ella ve que el destello de luz la pasa con la misma rapidez, c. Si un destello se envía a la estación desde la nave en movimiento, los observadores en la estación medi-rán la rapidez del destello como c. La rapidez de la luz tiene el mismo valor sin importar la rapidez de la fuente o del receptor. Todos los observadores que midan la rapidez de la luz descubrirán que tiene el mismo valor, c. Cuanto más se piensa en esto, más parece no tener sentido. Descubrirás que la explicación tiene que ver con la relación entre el espacio y el tiempo.

35.3 Simultaneidad

Una consecuencia interesante del segundo postulado de Einstein ocurre con el concepto de simultaneidad. Se dice que dos eventos son simultáneos si ocurren al mismo tiempo. Considera, por ejemplo, una fuente de luz en el centro exacto del compar-F I G U R A 3 5 . 4

timiento de una nave espacial (Figura 35.4). Cuando la fuente de luz se enciende, Desde el punto de vista del observador

la luz se dispersa en todas direcciones con rapidez c. Puesto que la fuente de luz es que viaja en el interior del compartimiento, la luz proveniente de la fuente

equidistante de los extremos frontal y posterior del compartimiento, un observador recorre distancias iguales hacia ambos

en el interior del mismo descubre que la luz llega al extremo frontal en el mismo ins-extremos del compartimiento y, en

tante que llega al extremo posterior. Esto ocurre ya sea que la nave esté en reposo o en consecuencia, golpea ambos extremos en movimiento con velocidad constante. Los eventos de golpear el extremo posterior y forma simultánea.

golpear el extremo frontal ocurren simultáneamente para este observador en el interior de la nave espacial.

Pero, ¿qué hay de un observador externo que ve los mismos dos eventos desde otro marco de referencia, por decir, desde un planeta que no se mueve con la nave? Para dicho observador, estos mismos dos eventos no son simultáneos. A medida que la luz sale de la fuente, este observador ve la nave moverse hacia adelante, de modo que la parte posterior del compartimiento se mueve hacia el haz mientras el frente se aleja de él.

En consecuencia, el haz que va hacia la parte posterior del compartimiento tiene una distancia más corta que recorrer que el haz que va hacia adelante (Figura 35.5). Dado que la rapidez de la luz es la misma en ambas direcciones, este observador externo ve el evento de la luz que golpea el extremo posterior del compartimiento antes de ver el evento de la luz que golpea el extremo frontal del compartimiento. (Desde luego, se F I G U R A 3 5 . 5

asume que el observador puede discernir estas pequeñas diferencias.) Un poco de raLos eventos de la luz que golpea los

zonamiento mostrará que un observador en otra nave que pase en la dirección opuesta extremos frontal y posterior del compartimiento no son simultáneos desde el

diría que la luz llega primero al extremo frontal.

punto de vista de un observador en un

Dos eventos que son simultáneos en un marco de referencia no necesitan ser marco de referencia diferente. Debido al

movimiento de la nave, la luz que golpea

simultáneos en un marco que se mueve con respecto al primer marco.

el extremo posterior del compartimiento

Esta no simultaneidad de los eventos en un marco que son simultáneos en otro, es no tiene que ir tan lejos y golpea más

pronto que la luz que llega al extremo

un resultado meramente relativista, una consecuencia de que la luz siempre tenga la frontal del compartimiento.

misma rapidez para todos los observadores.

C A PÍ T U LO 35 T EO R Í A D E L A R EL AT I V I DA D ESP ECI A L

663

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¿Cómo es que la no simultaneidad de escuchar el trueno después de ver el relámpago es similar a la no simultaneidad relativista?

2. Supón que el observador que está de pie en un planeta en la Figura 35.5

ve un par de relámpagos que golpean en forma simultánea los extremos frontal y posterior del compartimiento de la nave espacial de gran rapidez. ¿Los golpes del relámpago serán simultáneos para un observador en medio del compartimiento de la nave espacial? (Supón aquí que el observador puede detectar cualquier pequeña diferencia del tiempo en que la luz viaja desde los extremos hasta el medio del compartimiento.) C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. ¡No lo es! El intervalo de tiempo entre escuchar el trueno y ver el relámpago no tiene nada que ver con observadores en movimiento o con la relatividad. En tal caso, sólo corriges el tiempo que las señales (trueno y luz) tardan en llegar a ti. La relatividad o simultaneidad es una discrepancia genuina entre las observaciones hechas por los observadores en movimiento relativo, y no sólo una disparidad entre diferentes tiempos de viaje para distintas señales.

(a)

2. No. Un observador en medio del compartimiento verá el relámpago que golpea el frente del compartimiento antes de ver el relámpago que golpea la parte poste-

(b)

rior. Esto se muestra en las posiciones (a), (b) y (c) de la figura. En (a) se ven ambos relámpagos golpear los extremos del compartimiento al mismo tiempo, de acuerdo con el observador exterior. En la posición (b), la luz proveniente del relámpago frontal llega al observador en el interior de la nave espacial. Un poco después, en (c)

(c), la luz proveniente del relámpago posterior llega a este observador.

35.4 El espacio-tiempo y la dilatación del tiempo

Cuando miras las estrellas, te das cuenta de que en realidad estás viendo hacia atrás en el tiempo. Las estrellas que se ven más lejanas son las estrellas que se ven desde hace mucho más tiempo. Mientras

más pienses en esto, más evidente será que el espacio y el tiempo deben tener una muy estrecha relación.

El espacio en el que vives es tridimensional; esto es, puedes especificar la posición y

de cualquier ubicación en el espacio con tres dimensiones. Por ejemplo, estas dimensiones podrían ser norte-sur, este-oeste y arriba-abajo. Si estuvieras en el rincón de P

una habitación rectangular y quisieras especificar la posición de cualquier punto de la habitación, podrías hacerlo con tres números. El primero sería el número de metros que el punto está a lo largo de una línea que une la pared lateral y el suelo; el segundo x

z

sería el número de metros que el punto está a lo largo de una línea que une la pared trasera adyacente y el suelo, y el tercero sería el número de metros que el punto está por encima del suelo o a lo largo de la línea vertical que une las paredes en el rincón. Los F I G U R A 3 5 . 6

físicos se refieren a estas tres líneas como los ejes coordenados de un marco de referencia El punto P puede especificarse con tres (Figura 35.6). Tres números (las distancias a lo largo de los ejes x, y y z) especifican la números: las distancias a lo largo del eje posición de un punto en el espacio.

x, el eje y y el eje z.

También se utilizan tres dimensiones para especificar el tamaño de los objetos. Una caja, por ejemplo, se describe por su largo, ancho y altura. Pero las tres dimensiones no ofrecen la imagen completa. Hay una cuarta dimensión: el tiempo. La caja no siempre fue una caja con largo, ancho y altura determinados. Comenzó como una caja sólo en cierto punto en el tiempo, el día cuando la fabricaron. Ni siempre será una caja. En algún momento podría ser aplastada, quemada o destruida de algún otro modo. Así que las tres dimensiones del espacio son una descripción válida de la caja sólo durante un periodo SCREENCAST: Dilatación del tiempo

especificado. No puedes hablar de un modo significativo del espacio sin implicar el tiem-ESPACIO ESPACIO

TIEMPO

c

po. Las cosas existen en el espacio-tiempo. Cada objeto, cada persona, cada planeta, cada TIEMPO

estrel a, cada galaxia existen en lo que los físicos llaman "el continuo espacio-tiempo".

Dos observadores que están lado a lado en reposo relativo entre sí comparten el mismo F I G U R A 3 5 . 7

marco de referencia. Ambos estarían de acuerdo con las mediciones de intervalos de es-Todas las mediciones de espacio y tiem-

pacio y tiempo entre eventos dados, así que se dice que comparten el mismo ámbito de po de la luz se unifican mediante c.

espacio-tiempo. Sin embargo, si entre el os existe un movimiento relativo, los observadores no estarán de acuerdo con estas mediciones de espacio y tiempo. A rapideces ordinarias, las diferencias en sus mediciones son imperceptibles, pero a rapideces cercanas a la rapidez de la luz, las llamadas rapideces relativistas, las diferencias son apreciables. Cada observador está en un reino diferente del espacio-tiempo, y las mediciones de espacio y tiempo de un observador difieren de las mediciones del otro observador en algún otro reino del espacio-tiempo. Las mediciones no difieren al azar, sino en tal forma que cada observador siempre medirá la misma razón de espacio y tiempo para la luz: cuanto mayor sea la distancia medi-Espejo

da en el espacio, mayor será el intervalo de tiempo medido. Esta razón constante de espacio y tiempo para la luz, c, es el factor unificador entre diferentes reinos de espacio-tiempo y es Destello de luz

la esencia del segundo postulado de Einstein.

Examina la noción de que el tiempo puede estirarse. Imagina que de alguna forma puedes observar un destello de luz que rebota de ida y

vuelta entre un par de espejos Espejo

paralelos, como una bola que rebota de ida y vuelta entre el suelo y el techo. Si la distancia entre los espejos es fija, entonces el arreglo constituye un reloj de luz porque los viajes de ida y vuelta del destello tardan iguales intervalos de tiempo (Figura 35.8).

F I G U R A 3 5 . 8

Supón que este reloj de luz está en el interior de una nave espacial transparente de gran Un reloj de luz. Un destello de luz

rapidez. Un observador que viajara con la nave y observara el reloj de luz (Figura 35.9a) rebotará hacia arriba y hacia abajo entre

espejos paralelos y marcará iguales inter-

vería el destello que se refleja recto hacia arriba y hacia abajo entre los dos espejos, valos de tiempo.

como lo haría si la nave espacial estuviera en reposo. Este observador no ve efectos extraños. Nota que, dado que el observador está dentro de la nave y se mueve junto con ella, no hay movimiento relativo entre el observador y el reloj de luz; se dice que el observador y el reloj comparten el mismo marco de referencia en el espacio-tiempo.

F I G U R A 3 5 . 9

(a) Un observador que se mueve con la

nave espacial nota el destello de luz que

se mueve verticalmente entre los espejos

del reloj de luz.

(b) Un observador que ve pasar la nave

espacial en movimiento sigue el destello

(a)

(b)

que se mueve a lo largo de una trayecto-

ria diagonal.

Supón que ahora estás de pie en el suelo mientras la nave espacial pasa zumbando junto a ti con gran rapidez, por decir, la mitad de la rapidez de la luz. Las cosas son bastante diferentes desde este marco de referencia, porque no ves la trayectoria de la luz como un simple movimiento hacia arriba y hacia abajo. Debido a que cada destello se mueve en sentido horizontal mientras se mueve en sentido vertical entre los dos espejos, ves que el destello sigue una trayectoria diagonal. Observa en la Figura 35.9b que, desde tu marco de referencia en tierra, el destello recorre una distancia más larga conforme hace un viaje redondo entre los espejos, mucho más larga que la distancia que recorre en el marco de referencia del observador que viaja con la nave. Puesto que la rapidez de la luz es la misma en todos los marcos de referencia (segundo postulado de Einstein), el destello debe viajar durante un correspondiente tiempo más largo entre los espejos en tu marco que en el marco de referencia del observador a bordo. Esto se deduce de la definición de rapidez: distancia dividida entre tiempo. La distancia diagonal más larga debe dividirse entre un intervalo de tiempo proporcionalmente más largo para producir un valor invariable para la rapidez de la luz. Este alargamiento del tiempo se denomina dilatación del tiempo.

C A PÍ T U LO 35 T EO R Í A D E L A R EL AT I V I DA D ESP ECI A L

665

F I G U R A 3 5 . 1 0

La distancia más larga cubierta

Distancia

por el destello de luz al seguir la

trayectoria diagonal más larga

de la derecha debe dividirse entre

Distancia

Distancia

Distancia

un correspondiente intervalo de

tiempo más largo para producir

un valor invariable para la rapidez

Distancia

Distancia

de la luz.

=

= c

Tiempo

Tiempo

En el ejemplo se consideró un reloj de luz, pero lo mismo sucede con cualquier tipo de reloj. Todos los relojes corren con más lentitud cuando se mueven que cuando están en reposo. La dilatación del tiempo tiene que ver, no con la mecánica del reloj, sino con la naturaleza del tiempo en sí.

La relación de la dilatación del tiempo para diferentes marcos de referencia en el espacio-tiempo puede derivarse de la Figura 35.10 con simple geometría y álgebra.1

La relación entre el tiempo t (llámalo tiempo propio) en el marco de referencia que se 0

mueve con el reloj y el tiempo t medido al ver el mismo reloj en otro marco de referencia (llámalo tiempo relativo) es:

t

t =

0

2

v

1 − (

⎞

⎟ 2

c ⎠⎟

donde v representa la rapidez del reloj en relación con el observador externo (la misma que la rapidez relativa entre los dos observadores) y c es la rapidez de la luz. La cantidad:

⎛ 2

v ⎞

1 − ⎜⎟ 2 c ⎠⎟

1En la figura de abajo el reloj de luz se muestra en tres posiciones sucesivas. Las líneas diagonales representan la trayectoria del destello de luz cuando parte del espejo inferior en la posición 1, se mueve hacia el espejo superior en la posición 2 y luego viaja de vuelta hacia el espejo inferior en la posición 3. Las distancias en el diagrama se nombran ct, vt y ct , lo que se deriva del hecho de que la distancia recorrida por un objeto con movimiento 0

uniforme es igual a su rapidez multiplicada por el tiempo.

El símbolo t representa el tiempo que el destello tarda en moverse entre los espejos, medido desde un marco 0

de referencia fijo respecto del reloj de luz. Éste es el tiempo del movimiento recto hacia arriba y hacia abajo. La rapidez de la luz es c y la trayectoria de la luz se ve moverse una distancia vertical ct . Esta distancia entre espejos 0

está en ángulos rectos respecto del movimiento del reloj de luz y es la misma en ambos marcos de referencia.

El símbolo t representa el tiempo que el destello tarda en moverse de un espejo a otro, medido desde un marco de referencia en el cual el reloj de luz se mueve con rapidez v. Debido a que la rapidez de la luz es c y el tiempo que tarda en ir de la posición 1 a la posición 2 es t, la distancia diagonal recorrida es ct. Durante este lapso t, el reloj (que viaja horizontalmente con rapidez v) se mueve una distancia horizontal vt de la posición 1

a la posición 2.

Como la figura muestra, estas tres distancias constituyen un triángulo rectángulo en el cual ct es la hipotenusa y ct y vt son los catetos. Un teorema bien conocido de la geometría, el teorema de Pitágoras, afirma que el 0

cuadrado de la hipotenusa es igual a la suma de los cuadrados de los dos catetos. Si aplicas esta fórmula a la figura, obtienes

2 2

c t = 2 2

2 2

c t

v t

0 +

2 2

c t − 2 2

v t = 2 2

c t 0

⎡

2

v

2

⎛ ⎞ ⎤

t ⎢ ***1 −***

2

t

⎝ ⎢ ***2***

c ⎠ ⎢ ⎢ =

⌊

⌋

0

2

Trayectoria de luz como

t

2

t =

0

se ve desde una

2

v ⟩

ct

ct 0

posición en reposo

1 − ⟨| ***2 c*** ⟩|

t

vt

t =

0

Espejos en la

Espejos en la

Espejos en la

2

v

1 − (

)

posición 1

posición 2

posición 3

|| 2

c ||

es el mismo factor usado por Lorentz para explicar la contracción de la longitud. Al inverso de esta cantidad se le conoce como factor de Lorentz, (gamma minúscula griega); esto es,

=

1

2

v

1 − (

)

|| 2

c ||

Entonces, la ecuación de la dilatación del tiempo puede expresarse de manera más sencil a como: t γ t 0

Observa los términos en γ. Algo de jugueteo mental te mostrará que γ siempre es mayor que 1 para cualquier rapidez v mayor que 0. Observa que, debido a que la rapidez v siempre es menor que c, la

razón v/ c siempre es menor que 1; lo mismo sucede con v 2/ c 2.

¿Puedes ver que, entonces, γ es mayor que 1? Ahora considera el caso donde v = 0. Esta razón v 2/ c 2 es 0, y, para rapideces cotidianas, donde v es despreciable comparada con c, prácticamente es 0. Entonces, 1 v 2/ c 2 tiene un valor de 1, al igual que lo tiene 1 − v 2 / c 2, lo cual hace γ 1. Entonces se encuentra que t = t : los intervalos de tiempo parecen 0

ser iguales en ambos marcos de referencia. Para rapideces mayores, v/ c está entre 0 y 1, y 1 v 2/ c 2 es menor que 1; lo mismo sucede con 1 − v 2 / c 2. Esto hace que sea mayor que 1, de modo que t multiplicado por un factor mayor que 1 produce un valor ma -

0

yor que t , una elongación, una dilatación del tiempo.

0

Para considerar algunos valores numéricos, supón que v es 50% de la rapidez de la 5

luz. Entonces, se sustituye 0.5 c por v en la ecuación de dilatación del tiempo y, después 4

de un poco de aritmética, se encuentra que γ 1.15, de modo que t 1.15 t . Esto 0

significa que, si examinaras un reloj en una nave espacial que viaja a la mitad de la 3

rapidez de la luz, verías que el segundero tarda 1.15 minutos en hacer una revolución, 2

mientras que un observador que viaje con el reloj descubriría que tarda 1 minuto. Si 1

la nave espacial pasa junto a ti a 87% de la rapidez de la luz, γ 2 y t 2 t . Medirías 0

1

1

3

que los eventos temporales en la nave espacial tardan el doble que los intervalos ha-c

c

c

c

4

2

4

bituales, porque las manecillas de un reloj en la nave girarían sólo la mitad de rápido Rapidez

que las de tu propio reloj. Los eventos en la nave parecerían tener lugar en cámara F I G U R A 3 5 . 1 1

lenta. A 99.5% de la rapidez de la luz, γ 10 y t 10 t ; descubrirías que el segundero 0

Gráfica del factor de Lorentz γ como

del reloj de la nave espacial tarda 10 minutos en recorrer una revolución que requiere función de la rapidez.

1 minuto en tu reloj.

La dilatación del tiempo no es una ilusión; es real. Para poner estas cifras de otra manera, a 0.995 c, el reloj en movimiento parecería funcionar a un décimo de tu tasa; haría tictac sólo 6 segundos mientras tu reloj haría tictac 60 segundos. A 0.87 c, el reloj en movimiento hace tictac a la mitad de la tasa y muestra 30 segundos en tus 60 segundos; a 0.50 c, el reloj en movimiento hace tictac a una razón de 1/1.15 y hace tictac 52 segundos en tus 60 segundos. Los relojes en movimiento corren lento.

No hay nada raro en el reloj en movimiento en sí; tan sólo hace tictac al ritmo de un tiempo diferente. Cuanto más rápido se mueva el reloj, más lento parecerá funcionar visto por un observador que no se mueva con el reloj. Si fuera posible hacer que un reloj pasara volando junto a ti con la rapidez de la luz, el reloj no parecería funcionar en absoluto. Medirías que el intervalo entre tictacs sería infinito. ¡El reloj sería intemporal! Pero una cosa sí se mueve con la

rapidez de la luz: la luz misma. De modo que los fotones nunca envejecen.

No hay paso de tiempo para un fotón. Los fotones son verdaderamente intemporales.

Si una persona que pasara muy aprisa junto a ti consultara un reloj en tu marco de referencia, descubriría que tu reloj funciona tan lento como verías que lo hace el suyo. Cada F I G U R A 3 5 . 1 2

uno concluiría que el reloj del otro corre lento. En realidad no hay contradicción aquí, Cuando estás en reposo, ves que la nave

porque es físicamente imposible que dos observadores en movimiento relativo se refieran a viaja con la máxima razón de cambio

uno y el mismo reino de espacio-tiempo. Las mediciones hechas en un reino del espacio-en el tiempo: 24 horas por día. Cuando

tiempo no necesitan coincidir con las mediciones hechas en otro reino del espacio-tiempo.

viajas por el espacio a cerca de la razón

Sin embargo, la medición en la que todos los observadores coinciden es la rapidez de la luz.

máxima (la rapidez de la luz), ves que

el tiempo de la nave prácticamente está

La dilatación del tiempo se ha confirmado en el laboratorio innumerables veces quieto.

con aceleradores de partículas. Las vidas de las partículas radiactivas con movimiento

C A PÍ T U LO 35 T EO R Í A D E L A R EL AT I V I DA D ESP ECI A L

667

LECTURA DEL TIEMPO DURANTE UN VIAJE EN TRANVÍA

Imagina que tú eres Einstein a comienzos del siglo XX y que Un poco de viajas en un tranvía que se aleja de un enorme reloj en la

razonamiento te mostrará

plaza del pueblo. El reloj marca las 12 del mediodía.

que recibirás el mensaje

Expresar que marca las 12 del mediodía es decir que la luz que

“la 1 de la tarde” en

lleva la información “12 del mediodía” se refleja en el reloj y viaja cualquier momento entre

hacia ti por tu línea de visión. Si de pronto mueves la cabeza a un

60 minutos hasta un

lado, la luz que lleva la información, en lugar de llegar a tu ojo,

infinito de tiempo después

pasa de largo, tal vez hacia el espacio. Ahí afuera, un observador

de recibir el mensaje

que más tarde recibe la luz dice: “oh, ahora en la Tierra son las

“las 12 del mediodía”,

12 del mediodía”. Pero, desde tu punto de vista, ahora es más

dependiendo de cuál sea tu

tarde. Tú y el observador distante ven las 12 del mediodía en

rapidez entre los extremos

momentos diferentes. Te preguntas más sobre esta idea. Si

de cero y la rapidez de la

el tranvía viajara tan rápido como la luz, entonces el tranvía

luz. Desde tu marco de

continuaría con la información de la luz que dice “las 12 del

referencia de gran rapidez

mediodía”. Entonces, si viajas con la rapidez de la luz, siempre

(pero menor que c), ves que todos los eventos que tienen lugar en el serán las 12 del mediodía en la plaza del pueblo. En otras palabras:

marco de referencia del reloj (que es la Tierra) ocurren en movimiento

¡el tiempo en la plaza del pueblo se congela!

lento. Si inviertes la dirección y viajas con gran rapidez de vuelta hacia Si el tranvía no se mueve, ves que el reloj de la plaza del pueblo

el reloj, verás que todos los eventos que tienen lugar en el marco de se mueve al futuro a la tasa de 60 s/min; si te mueves con la rapidez referencia del reloj aumentan su rapidez. Cuando regresas y te sientas de la luz, ves que los segundos del reloj tardan un tiempo infinito.

de nuevo en la plaza, ¿los efectos de ir y venir se compensan entre sí?

Éstos son los dos extremos. ¿Qué hay en medio? ¿Cómo se vería el

Sorprendentemente, ¡no! El tiempo se estirará. El reloj de pulsera que avance de las manecillas del reloj mientras te mueves con rapideces

usas todo el tiempo y el reloj del poblado no coincidirán. Esto es la menores que la rapidez de la luz?

dilatación del tiempo.

rápido aumentan conforme su rapidez aumenta, y la cantidad de aumento es justo la que predice la ecuación de Einstein. La dilatación del tiempo se ha confirmado también para movimiento no tan rápido. En 1971, para poner a prueba la teoría de Einstein, cuatro relojes atómicos de cesio se pusieron a volar dos veces alrededor del mundo en aviones comerciales con horario regular, una vez hacia el este y otra vez hacia el oeste, para poner a prueba la teoría de la relatividad de Einstein con relojes macroscópicos. Los relojes indicaron diferentes tiempos después de sus viajes redondos.

Con base en la escala de tiempo atómico del Observatorio Naval de Estados Unidos, las diferencias en tiempo observadas, en mil millonésimas de segundo, estuvieron en concordancia con la predicción de Einstein. En la actualidad, con relojes atómicos en órbita alrededor de la Tierra como parte del Sistema de Posicionamiento Global, los ajustes por los efectos de la dilatación del tiempo son esenciales para usar las señales provenientes de los relojes a fin de ubicar posiciones en la Tierra.

Todo esto parece muy extraño sólo porque no es una experiencia común lidiar con El Sistema de Posicionamiento

Global (GPS, por sus siglas

mediciones hechas a rapideces relativistas o mediciones del tipo reloj atómico a rapideces en inglés) tiene en cuenta la

ordinarias. La teoría de la relatividad no es de sentido común. Pero el sentido común, de dilatación del tiempo de los

acuerdo con Einstein, es esa capa de prejuicios colocada en la mente antes de los 18 años relojes atómicos en órbita. De otro

de edad. Si hubieras pasado tu juventud viajando por el Universo en naves espaciales a modo, tu receptor GPS perdería tu

gran rapidez, tal vez te sentirías cómodo con los resultados de la

relatividad.

posición, lo que sería muy grave.

P U N T O D E C O N T R O L

1. Si te movieras en una nave espacial a gran rapidez con respecto a la Tierra, ¿observarías alguna diferencia en tu pulso? ¿En el pulso de las personas en la Tierra?

2. ¿Los observadores A y B estarán de acuerdo en las mediciones de tiempo si A se mueve a la mitad de la rapidez de la luz con respecto a B? ¿Si tanto A como B se mueven juntos con la mitad de la rapidez de la luz con respecto a la Tierra?

3. ¿La dilatación del tiempo significa que el tiempo en realidad pasa más lento en los sistemas en movimiento o sólo que parece pasar más lento?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. No habría rapidez relativa entre tú y tu pulso porque los dos comparten el mismo marco de referencia. Por tanto, no observarías

efectos relativistas en tu pulso. Sin embargo, habría un efecto relativista entre tú y las personas en la Tierra. Descubrirías que su pulso es más lento que lo normal (y ellos descubrirían que tu pulso es más lento que lo normal). Los efectos relativistas siempre se atribuyen al otro.

2. Cuando A y B se mueven uno con respecto al otro, cada uno observa que el tiempo transcurre más lento en el marco del otro. De modo que no están de acuerdo en las mediciones del tiempo. Cuando se mueven al unísono, comparten el mismo marco de referencia y están de acuerdo en las mediciones del tiempo. Cada uno ve que el tiempo del otro transcurre de manera normal, y cada uno ve los eventos en la Tierra en el mismo movimiento lento.

3. Que el tiempo transcurra más lento en los sistemas en movimiento no es sólo una ilusión derivada del movimiento. El tiempo en realidad pasa más lento en un sistema en movimiento con respecto a uno en reposo relativo, como verás en la siguiente sección. ¡Sigue leyendo!

El viaje del gemelo

Una ilustración espectacular de la dilatación del tiempo la ofrecen dos gemelos idénticos, uno es un astronauta que realiza un viaje redondo a gran rapidez en la galaxia mientras el otro permanece en casa en la Tierra. Cuando el gemelo viajero regresa, es más joven que el gemelo que se quedó en casa. Cuánto más joven depende de las rapideces relativas implicadas. Si el gemelo viajero mantiene una rapidez de 50% de la rapidez de la luz durante 1 año (de acuerdo con los relojes a bordo de la nave), en la Tierra habrán transcurrido 1.15 años. Si el gemelo viajero mantiene una rapidez de 87% de la rapidez de la luz durante un año, entonces en la Tierra habrán transcurrido 2 años. A 99.5% de la rapidez de la luz, 10 años terrestres transcurrirían en un año de la nave espacial. Con esta rapidez, el gemelo viajero envejecería un solo año mientras el gemelo que se quedó en casa envejecería 10 años.

F I G U R A 3 5 . 1 3

El gemelo viajero no envejece tan rápido

como el gemelo que se queda en casa.

Con frecuencia surge una pregunta: dado que el movimiento es relativo, ¿por qué el efecto no funciona igual de bien a la inversa? ¿Por qué cuando el gemelo viajero regresara no encontraría a su

gemelo en casa más joven que él mismo? Se demostrará que, desde los marcos de referencia tanto del gemelo en la Tierra como del gemelo viajero, es el gemelo en la Tierra quien envejece más. Primero, piensa en una nave espacial que flota en reposo con respecto a la Tierra. Supón que la nave envía al planeta breves destel os de luz a espa-El cosmonauta Sergei Avdeyev

cios regulares (Figura 35.14). Transcurrirá un tiempo determinado antes de que los deste-pasó más de dos años en órbi-

l os lleguen al planeta, tal como transcurren 8 minutos antes de que la luz solar llegue a la ta terrestre en la nave espacial

Tierra. Los destel os de luz encontrarán al receptor en el planeta con la rapidez c. Debido Mir y, debido a la dilatación del

tiempo, ¡él es hoy dos centésimas

a que no hay movimiento relativo entre el emisor y el receptor, los destel os sucesivos se de segundo más joven de lo que

recibirán con la frecuencia con la que se envíen. Por ejemplo, si un destel o se envía desde sería si nunca hubiera estado en el

la nave cada 6 minutos, entonces, después de cierta demora inicial, el receptor recibirá espacio!

un destel o cada 6 minutos. Sin movimiento de por medio, no hay nada raro en esto.

C A PÍ T U LO 35 T EO R Í A D E L A R EL AT I V I DA D ESP ECI A L

669

F I G U R A 3 5 . 1 4

Cuando no hay movimiento de por

Nave espacial en reposo con

medio, los destellos de luz se reciben con

respecto a la Tierra

la frecuencia con la que la nave espacial

los envía.

Envía destellos cada

Ve destellos

6 minutos

cada

6 minutos

Cuando hay movimiento de por medio, la situación es muy diferente. Es importante observar que la rapidez de los destellos todavía será c, sin importar cómo se muevan la nave espacial o el receptor. Sin embargo, la frecuencia con la que se ven los destellos depende mucho del movimiento relativo implicado. Cuando la nave viaja hacia el receptor, éste ve los destellos con más frecuencia. Esto ocurre no sólo porque el tiempo se altera por el movimiento, sino principalmente porque cada destello sucesivo tiene menos distancia que recorrer a medida que la nave se acerca al receptor. Si la nave emite un destello cada 6 minutos, los destellos se verán a intervalos de menos de 6 minutos.

Supón que la nave viaja tan rápido como para que los destellos se vean con el doble de frecuencia. Entonces se ven a intervalos de 3 minutos (Figura 35.15).

F I G U R A 3 5 . 1 5

Cuando el emisor se mueve hacia el

receptor, los destellos se ven con más

frecuencia.

Envía destellos cada

Ve destellos

6 minutos

cada

3 minutos

Si la nave se aleja del receptor con la misma rapidez y todavía emite

destellos a intervalos de 6 minutos, el receptor verá estos destellos con la mitad de la frecuencia; esto es, a intervalos de 12 minutos (Figura 35.16). Esto se debe principalmente a que cada destello sucesivo tiene que recorrer mayor distancia a medida que la nave se aleja del receptor.

F I G U R A 3 5 . 1 6

Cuando el emisor se aleja del receptor,

los destellos están más espaciados y se

ven con menos frecuencia.

Envía destellos

Ve destellos

cada 6 minutos

cada

12 minutos

PA R T E O C H O

R EL AT I V I DA D

El efecto de alejarse es exactamente el opuesto de acercarse al receptor. De modo que si los destellos se reciben con el doble de frecuencia cuando la nave espacial se aproxima (los intervalos de destellos de 6 minutos se ven cada 3 minutos), se reciben a la mitad de la frecuencia cuando se aleja (los intervalos de destellos de 6 minutos se ven cada 12 minutos).2

Esto significa que si dos eventos están separados por 6 minutos de acuerdo con el reloj de la nave espacial, los destellos se verán separados por 12 minutos cuando la nave espacial se aleje y por 3 minutos cuando la nave se aproxime.

P U N T O D E C O N T R O L

1. Si la nave espacial emite una señal inicial "de salida", seguida de un destello cada 6 minutos durante una hora, ¿cuántos destellos emitirá?

2. La nave envía destellos igualmente espaciados cada 6 minutos mientras se aproxima al receptor con rapidez constante. ¿Estos destellos estarán igualmente espaciados cuando encuentren al receptor?

3. Si el receptor ve estos destellos a intervalos de 3 minutos, ¿cuánto tiempo transcurrirá entre la señal inicial y el último destello (en el marco de referencia del receptor)?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. La nave emitirá un total de 10 destellos en 1 h porque (60 min)/ (6 min) = 10 (11, si cuentas la señal inicial).

2. Sí. Siempre y cuando la nave se mueva con rapidez constante, los destellos igualmente espaciados se verán igualmente espaciados, pero con más frecuencia. (Si la nave acelerara mientras envía los destellos, entonces los destellos no se verían a intervalos igualmente espaciados.)

3. Treinta minutos, porque los 10 destellos llegan cada 3 min.

Aplica esta duplicación y reducción a la mitad de los intervalos de destellos a los gemelos. Supón que el gemelo viajero se aleja del

gemelo en la Tierra con la misma gran rapidez durante 1 hora y luego rápido da la vuelta y regresa en 1 hora. Sigue esta línea de razonamiento con ayuda de la Figura 35.17. El gemelo viajero hace un viaje redondo de 2 horas, de acuerdo con todos los relojes a bordo de la nave espacial. Sin embargo, des -

de el marco de referencia de la Tierra, no se verá que este viaje dure 2 horas. Puedes ver esto con la ayuda de los destellos provenientes del reloj de luz de la nave.

2Esta relación recíproca (reducción a la mitad y duplicación de frecuencias) es una consecuencia de la constancia de la rapidez de la luz y puede ilustrarse con un ejemplo. Supón que un emisor en la Tierra emite destel os separados 3 minutos hacia un observador distante en un planeta que esté en reposo en relación con la Tierra. Entonces, el observador ve destel os cada 3 min. Ahora, supón que un segundo observador viaja en una nave espacial entre la Tierra y el planeta con una rapidez tan alta que le permite ver los destel os con la mitad de frecuencia: separados 6 min. Esta reducción a la mitad en la frecuencia ocurre para una rapidez de alejamiento de 0.6 c. Puedes ver que la frecuencia se duplicará para una rapidez de aproximación de 0.6 c si supones que la nave espacial emite su propio destel o cada vez que observa un destel o terrestre; esto es, cada 6 min. ¿Cómo ve estos destel os el observador en el planeta distante? Dado que los destel os terrestres y los destel os de la nave espacial viajan juntos con la misma rapidez, c, el observador verá no sólo los destel os terrestres cada 3 min, sino también los destel os de la nave cada 3 min. De este modo, aunque una persona en la nave espacial emita destel os cada 6 min, el observador los observa cada 3 min, al doble de la frecuencia de emisión. En el caso de una rapidez de retroceso donde la frecuencia parece reducida a la mitad, la frecuencia parece du -

plicada por la misma rapidez de aproximación. Si la nave viajara más rápido, de modo que la frecuencia de recesión fuese 1/3 o 1/4, entonces la frecuencia de aproximación se triplicaría o cuadruplicaría, respectivamente. Esta rela -

ción recíproca no se sostiene con las ondas que necesitan un medio. En el caso de las ondas sonoras, por ejemplo, una rapidez que resulte en una duplicación de la frecuencia de emisión en la aproximación produce 2/3 (no 1/2) de la frecuencia de emisión en el alejamiento. De modo que el efecto Doppler relativista difiere del que se experimenta con el sonido.

F I G U R A 3 5 . 1 7

La nave espacial emite destellos cada 6 min durante un viaje de 2 horas. Durante la primera hora, se aleja de la Tierra. Durante la segunda hora, se aproxima a la Tierra.

Ve destellos

Envía destellos

cada 12 minutos

cada 6 minutos

(a)

Todavía recibe destellos a intervalos de 12 minutos de la nave que se aleja

Nave en viaje de regreso; todavía envía destellos cada 6 minutos

(b)

Todavía envía destellos cada 6 minutos

Ve destellos de la nave que se

(c)

aproxima cada

3 minutos

A medida que la nave se aleja de la Tierra, emite un destello de luz cada 6 minutos.

Estos destellos se reciben en la Tierra cada 12 minutos. Durante la hora de alejamiento de la Tierra, se emiten un total de 10 destellos (después de la señal "de salida"). Si la nave parte de la Tierra a mediodía, los relojes a bordo de la nave marcan 1:00 p.m. cuando se emite el décimo destello. ¿Qué hora será en la Tierra cuando este décimo destello llegue a la Tierra? La respuesta es 2:00 p.m. ¿Por qué? Porque el tiempo que la Tierra tarda en recibir 10 destellos a intervalos de 12 minutos es 10 3 (12 min), o 120 min (5 2 h).

F I G U R A 3 5 . 1 8

El viaje que tarda 2 h en el marco de

referencia de la nave espacial tarda 2½ h

Marco de referencia de la Tierra:

en el marco de referencia de la Tierra.

10 destellos × 12 min = 120 minutos

10 destellos × 3 min = 30 minutos

150 minutos

1

2

2 horas

Marco de referencia de la nave espacial:

20 destellos × 6 min = 120 minutos

2 horas

Supón que la nave espacial de algún modo puede dar la vuelta "en ángulo cerrado" (en un tiempo tan corto que sea despreciable) y regresa con la misma rapidez alta. Durante la hora de regreso, emite

10 destel os más a intervalos de 6 min. Estos destel os se reciben cada 3 minutos en la Tierra, de modo que los 10 destel os llegan en 30 minutos. Un reloj en la Tierra marcará 2:30 p.m. cuando la nave espacial complete su viaje de 2 horas. ¡Puedes ver que el gemelo terrestre envejeció media hora más que el gemelo a bordo de la nave espacial!

El resultado es el mismo desde cualquier marco de referencia. Piensa de nuevo en el mismo viaje, sólo que esta vez con destellos emitidos desde la Tierra a intervalos regulares de 6 minutos de acuerdo con el tiempo en la Tierra. Desde el marco de referencia de la nave espacial que se aleja, estos destellos se reciben a intervalos de 12 minutos (Figura 35.19a). Esto significa que la nave espacial ve 5 destellos durante la hora que se aleja de la Tierra. Durante la hora de aproximación de la nave espacial, los destellos de luz se ven a intervalos de 3 minutos (Figura 35.19b), de modo que se verán 20 destellos.

F I G U R A 3 5 . 1 9

Los destellos enviados desde la Tierra a

intervalos de 6 min se ven a intervalos

Envía destellos

de 12 min en la nave cuando ésta se

cada 6 minutos

aleja y a intervalos de 3 min cuando se

aproxima.

Ve destellos

cada 12 minutos

(a)

Envía destellos

cada 6 minutos

Ve destellos

cada 3 minutos

(b)

Así que, puedes ver que la nave espacial recibe un total de 25 destellos durante su viaje de 2 horas. Sin embargo, de acuerdo con los relojes en la Tierra, el tiempo que tardó en emitir los 25 destellos a intervalos de 6 minutos fue 25 3 (6 min), o 150 min (= 2½ h). Esto se muestra en la Figura 35.20.

F I G U R A 3 5 . 2 0

Un intervalo de tiempo de 2½ h en la

Tierra se ve que tarda 2 h en el marco de

Marco de referencia de la Tierra:

referencia de la nave espacial.

25 destellos × 6 min = 150 minutos

1

2

2 horas

Marco de referencia de la nave espacial:

5 destellos × 12 min = 60 minutos

20 destellos × 3 min = 60 minutos

120 minutos

2 horas

De modo que los gemelos están de acuerdo en los mismos resultados, sin discutir sobre quién envejece más. Mientras que el gemelo terrestre permanece en un solo marco de referencia, el gemelo viajero experimentó dos marcos de referencia diferentes, separados por la aceleración de la nave espacial al dar la vuelta. La nave

espacial en efecto experimentó dos reinos de tiempo diferentes, mientras que la Tierra experimentó otro reino de tiempo distinto de los anteriores, pero uno solo. Los gemelos pueden reunirse de nuevo en el mismo lugar en el espacio sólo a expensas del tiempo.

C A PÍ T U LO 35 T EO R Í A D E L A R EL AT I V I DA D ESP ECI A L

673

P U N T O D E C O N T R O L

Dado que el movimiento es relativo, ¿no puede decirse también que la nave espacial está en reposo y la Tierra se mueve, en cuyo caso el gemelo en la nave espacial envejece más?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

No, no a menos que la Tierra dé la vuelta y regrese, como hizo la nave espacial en el ejemplo del viaje del gemelo. La situación no es simétrica porque un gemelo permanece en un solo marco de referencia en el espacio-tiempo durante el viaje, mientras el otro hace un cambio evidente de marco de referencia, como lo demuestra

la aceleración al dar la vuelta.

35.5 Suma de velocidades

La mayoría de las personas sabe que si caminas a 1 km/h por el pasillo de un tren que se mueve a 60 km/h, tu rapidez en relación con el suelo es 61 km/h si caminas en la misma dirección en que se mueve el tren y 59 km/h si caminas en la dirección contraria. Lo que la mayoría de las personas sabe es casi correcto. Cuando se tiene en SCREENCAST: Velocidades relativistas cuenta la relatividad especial, las rapideces son muy cercanas a 61 km/h y 59 km/h, respectivamente.

En el caso de los objetos cotidianos en movimiento uniforme (no acelerado), lo habitual es combinar las velocidades mediante la regla simple:

V 5 v 1 1 v 2

Pero esta regla no se aplica a la luz, que siempre tiene la misma rapidez, c. En términos estrictos, la regla anterior es una aproximación de la regla relativista para la suma de velocidades. Aquí no se abordará la larga derivación, sino que sólo se presentará la regla: v v

1 +

V =

2

v v

1+ 1 2

2

c

El numerador de esta fórmula es de sentido común. Pero esta simple suma de dos velocidades se altera por el segundo término en el denominador, que es significativo sólo cuando tanto v como v son casi c.

1

2

Como ejemplo, piensa en una nave espacial que se aleja de ti a una velocidad de 0.5 c. Dispara un cohete que empuja en la misma dirección y también se aleja de ti con una rapidez de 0.5 c con respecto a sí misma. ¿Qué tan rápido se mueve el cohete en relación a ti? La regla no relativista diría que el cohete se mueve con la rapidez de la luz en tu marco de referencia. Pero, de hecho,

0.5 c + . c

c

V =

0 5 =

= 0.8 c

0.25 2

c

1.25

1+

2

c

lo que ilustra otra consecuencia de la relatividad: ningún objeto material puede viajar tan rápido como la luz, ni más rápido.

Supón que la nave espacial en vez de ello dispara un pulso de luz láser en la dirección de su viaje. ¿Qué tan rápido se mueve el pulso en tu marco de referencia?

0.5 c + c

. c

V =

= 1 5 = c

0.5 2

c

1.5

1+

2

c

Sin importar cuáles sean las velocidades relativas entre los dos marcos, la luz que se mueve a c en un marco, se verá moverse a c en cualquier otro marco. Si intentas seguir la luz, nunca podrás atraparla.

674

PA R T E O C H O

R EL AT I V I DA D

Viaje espacial

Uno de los antiguos argumentos contra la posibilidad de que el ser humano realizara un viaje interestelar era que la vida es muy corta. Se argumentaba, por ejemplo, que la estrella más cercana a la Tierra (después del Sol), Alpha Centauri, está a 4 años-luz de distancia, y un viaje redondo, incluso a la rapidez de la luz, requeriría 8 años.3 E incluso para un viaje a la rapidez de la luz al centro de la galaxia, a 25,000 años-luz de distancia, se necesitarían 25,000 años. Pero estos argumentos no tienen en cuenta la dila tación del tiempo. El tiempo para una persona en la Tierra y el tiempo para una persona

en una nave espacial con gran rapidez no son lo mismo.

El corazón de una persona late al ritmo del reino de espacio-tiempo en el que se encuentra. Y un reino de espacio-tiempo parece igual que cualquier otro para el corazón, pero F I G U R A 3 5 . 2 1

no para un observador que se encuentra fuera del marco de referencia del corazón. Por Desde el marco de referencia de la

ejemplo, los astronautas que viajen a 99% de c podrían llegar a la estrel a Procyon (a 10.4

Tierra, la luz tarda 25,000 años en viajar años-luz de distancia) y regresar en 21 años terrestres. Sin embargo, debido a la dilatación del centro de la Vía Láctea al sistema

solar. Desde el marco de referencia de

del tiempo, sólo transcurrirían 3 años para los astronautas. Esto es lo que todos sus relojes una nave espacial a gran rapidez que

les dirían, y, en términos biológicos, sólo habrían envejecido 3 años. ¡Los oficiales espa-vuela del centro galáctico a la Tierra, el

ciales que les dieran la bienvenida a su regreso serían quienes habrían envejecido 21 años!

viaje tarda menos tiempo. Si un marco

A rapideces mayores, los resultados incluso son más impresionantes. Con una ra-de referencia pudiera unirse a la luz

pidez de 99.99% de c, los viajeros podrían recorrer una distancia de un poco más de misma, el tiempo de viaje podría redu-70 años-luz en un solo año de su tiempo; a 99.999% de c, esta distancia aumentaría a cirse a cero.

mucho más de 200 años-luz. ¡Un viaje de 5 años para ellos los llevaría más lejos de lo que la luz viaja en 1,000 años en el tiempo de la Tierra!

La tecnología actual no permite tales travesías. Conseguir suficiente energía de propulsión y protección contra la radiación son ambos problemas prohibitivos. Las naves espaciales que viajaran con rapideces relativistas necesitarían miles de mil ones de veces la energía utilizada para poner en órbita un transbordador espacial.

Incluso algún tipo de estatorreac-tor interestelar que recogiera gas hidrógeno interestelar para quemar en un reactor de fusión tendría que superar el enorme efecto retardador de recoger el hidrógeno a grandes rapideces.

Y los viajeros espaciales se toparían con partículas interestelares como si tuvieran un gran acelerador de partículas apuntando hacia el os. En la actualidad no se conoce ninguna forma de protección contra un bombardeo tan intenso de partículas durante periodos prolongados. Por el momento, el viaje espacial interestelar debe relegarse a la ciencia ficción, no porque haya una teoría científica que lo impida, sino tan sólo por la impracticabilidad del viaje espacial. Viajar cerca de la rapidez de la luz con la finalidad de aprovechar la dilatación del tiempo es por completo congruente con las leyes de la física.

Puedes mirar el pasado, pero no puedes ir al pasado. Por ejemplo, el pasado se experimenta cuando ves los cielos nocturnos. La luz de las estrellas que llega a tus ojos salió de dichas estrellas hace docenas, cientos, incluso millones de años. Lo que ves son las estrellas como eran hace mucho tiempo. Por tanto, eres testigo ocular de la historia antigua, y sólo puedes especular sobre lo que pudo ocurrir a las estrellas entretanto.

Si observas la luz que salió de una estrella, por decir, hace 100 años, entonces se deduce que cualquier ser dotado del sentido de la vista en dicho sistema solar te ve a ti con la luz que salió de aquí hace 100 años y que, además, si tiene supertelescopios, bien puede ser testigo ocular de los eventos terrestres ocurridos hace un siglo, las secuelas de la Guerra de Secesión estadounidense, por ejemplo. Vería tu pasado, pero también vería eventos en una dirección hacia adelante; vería tu reloj correr en el sentido de las manecillas del reloj.

Puedes especular sobre la posibilidad de que el tiempo también se mueva contra las manecil as del reloj hacia el pasado, así como en el sentido de las manecil as hacia el futuro. Podrías preguntar: ¿por qué en el espacio puedes moverte hacia adelante o hacia atrás, hacia la izquierda o la derecha, hacia arriba o hacia abajo, pero sólo puedes moverte en una dirección en el tiempo? Es muy interesante que las matemáticas de las interacciones de las partículas elementales permitan la "inversión del tiempo", aunque existen algunas interacciones de partículas que favorecen un poco una dirección en el tiempo. Las partículas hipotéticas que podrían moverse 3Un año-luz es la distancia que recorre la luz en 1 año,

9.46 3 1012 km.

C A PÍ T U LO 35 T EO R Í A D E L A R EL AT I V I DA D ESP ECI A L

675

SALTOS CENTENARIOS

Lleva la ciencia ficción hacia un posible tiempo en el futuro pasado. Nunca podrían regresar a la misma era en la Tierra de la en el que los problemas de los suministros de energía y la

cual se hubieran despedido. El tiempo, como se le conoce, viaja

radiación hayan sido superados y que los viajes espaciales

en una dirección: hacia adelante. Aquí en la Tierra, te mueves

sean habituales. Las personas tendrán la opción de hacer un viaje

constantemente hacia el futuro a la tasa estable de 24 horas

y regresar a cualquier siglo futuro de su elección. Por ejemplo, uno

al día. Un astronauta que parte en un viaje a las profundidades

podría partir de la Tierra en una nave espacial de gran rapidez en

del espacio debe vivir con el hecho de que, al regresar, habrá

el año 2100, viajar durante 5 años más o menos, y regresar en el

transcurrido mucho más tiempo en la Tierra del que el astronauta

año 2500. Uno podría vivir entre los terrícolas de dicho periodo

haya experimentado, subjetiva y psicológicamente, durante el

durante un rato y partir de nuevo para probar el año 3000.

viaje. El credo de todos los viajeros estelares, sin importar su

Las personas podrían seguir saltando hacia el futuro un

condición fisiológica, será el adiós permanente.

poco a expensas de su propio tiempo, pero no podrían viajar al

más rápido que la luz y hacia atrás en el tiempo se denominan taquiones. En cualquier caso, para el complejo organismo denominado ser humano, el tiempo sólo tiene una dirección.4

Esta conclusión se ignora despreocupadamente en un poema jocoso que es uno de los favoritos de los científicos:

Había una jovencita llamada Brillante

Quien viajó mucho más rápido que la luz.

Partió un día

En una forma relativa

Y regresó la noche anterior.

Incluso con la mente bien metida en la relatividad, de un modo inconsciente todavía podrías aferrarte a la idea de que existe un tiempo absoluto y comparar todos estos efectos relativistas con él: reconocer que el tiempo cambia de esta forma y de esa otra, para esta rapidez y para esa otra, y aun así sentir que existe un tiempo básico o Si viajar hacia atrás en el tiempo

absoluto. Puedes tender a creer que el tiempo que experimentas en la Tierra es fun-fuera posible, ¿no tendríamos

damental y que los otros tiempos no lo son. Esto es comprensible: eres terrícola. Pero turistas del futuro?

la idea es limitante. Desde el punto de vista de los observadores en alguna otra parte del Universo, puedes estarte moviendo a rapideces relativistas; ellos ven que vives en cámara lenta. Pueden ver que vives una vida cientos de veces más larga que la de ellos, como con supertelescopios los verías a ellos vivir vidas cientos de veces más

largas que la tuya. No hay un tiempo universalmente estándar; ninguno.

Uno piensa en el tiempo y luego en el Universo. Uno piensa en el Universo y se pregunta qué sucedió antes de que el Universo comenzara. Se pregunta qué ocurrirá si el Universo deja de existir en el tiempo. Pero el concepto de tiempo se aplica a eventos y entidades dentro del Universo, no a éste en su conjunto. El tiempo está "en" el Universo; el Universo no está "en" el tiempo. Sin el Universo, no hay tiempo —no hay antes, no hay después—. Del mismo modo, el espacio está "en" el Universo; el Universo no está "en" una región del espacio. No hay espacio "fuera" del Universo. El espacio-tiempo existe dentro del Universo. ¡Piensa en eso!5

35.6 Contracción de la longitud

Conforme los objetos se mueven por el espacio-tiempo, tanto el espacio como el tiempo cambian. En resumen, el espacio se contrae, lo que hace que los objetos parezcan más pequeños cuando pasan junto a ti con rapideces relativistas. Esta contracción SCREENCAST: Contracción

de la longitud

4Se ha especulado que, si uno retrocediera en el tiempo, uno no lo sabría, ¡porque entonces recordaría el futuro y pensaría que éste fue su pasado!

5Algunos físicos plantean la hipótesis de que el Universo es sólo uno de muchos universos coexistentes denominados en conjunto "el multiverso" (o "el megaverso"). Sin embargo, todavía no hay evidencia de la existencia de tales "universos paralelos".

de la longitud la propuso por primera vez el físico George F. FitzGerald y la expresó matemáticamente otro físico, Hendrik A. Lorentz (mencionado antes). Mientras estos físicos planteaban la hipótesis de que la materia se contrae, Einstein vio que lo que se contrae es el espacio en sí. No obstante, puesto que la fórmula de Einstein es la misma que la de Lorentz, a este efecto se le llama contracción de Lorentz: 2

v

F I G U R A 3 5 . 2 2

L = L 1

0

− 2

c

La contracción de Lorentz. El metro

mide la mitad de largo cuando viaja a

donde v es la velocidad relativa entre el objeto observado y el observador, c es la rapi -

87% de la rapidez de la luz con respecto

dez de la luz, L es la longitud medida del objeto en movimiento y L es la longitud 0

al observador.

medida del objeto en reposo.6

Supón que un objeto está en reposo de modo que v = 0. Cuando se sustituye v = 0 en la ecuación de Lorentz, se encuentra que L = L , como se esperaría. Cuando se sustituyen 0

varios valores grandes de v en la ecuación de Lorentz, comienzas a ver que el L calculado se hace cada vez más pequeño. A 87% de c, un objeto se contraería a la mitad de su longitud original. A 99.5% de c, se contraería a un décimo de su longitud original. Si el objeto de alguna forma pudiera moverse a c, su longitud sería cero. Ésta es una de las razones por las que se dice que la rapidez de la luz es el límite superior de la rapidez de cualquier objeto en movimiento. Otra jocosa quintilla popular entre los científicos es ésta: Dilatación del tiempo: los relojes

Había un joven esgrimista llamado Fisk,

en movimiento corren más lento.

Cuyo embate era excesivamente rápido.

Contracción de la longitud: los

objetos en movimiento son más

Tan rápida era su acción

pequeños (en la dirección de

Que la contracción de Lorentz

movimiento).

Redujo su florete a un disco.

Como indica la Figura 35.23, la contracción tiene lugar sólo en la dirección del movimiento. Si un objeto se mueve en sentido horizontal, ninguna contracción tiene lugar en sentido vertical.

F I G U R A 3 5 . 2 3

Con la rapidez, la longitud en la direc-

ción del movimiento disminuye. Las

longitudes en la dirección perpendicular

no cambian.

v = 0

v = 0.87 c v = 0.995 c v = 0.999 c v = c (?) La contracción de la longitud debe ser de considerable interés para los viajeros espaciales. El centro de la Vía Láctea está a 25,000 años-luz de distancia. ¿Esto significa que si viajas en dicha dirección con la rapidez de la luz, tardarías 25,000 años en llegar ahí?

Desde un marco de referencia en la Tierra, sí; pero para los viajeros espaciales, ¡decidida-mente, no! A la rapidez de la luz, la distancia de 25,000 años-luz se contraería a ninguna distancia en absoluto. ¡Los imaginarios viajeros espaciales llegarían ahí al instante!

En el caso de los hipotéticos viajes a rapideces cercanas a la rapidez de la luz, la contracción de la longitud y la dilatación del tiempo son sólo dos caras del mismo fenómeno. Si los astronautas van tan rápido que descubren que la distancia a la estrella más cercana está a sólo 1 año-luz en lugar de los 4 años-luz medidos desde la Tierra, hacen el viaje en un poco más de 1 año. Pero los observadores en la

Tierra dicen que los relojes a bordo de la nave espacial son tan lentos que sólo registran 1 año en 4 años del tiempo terrestre. Ambos están de acuerdo en lo que ocurre: los astronautas sólo envejecen por 6Esto se puede expresar como $L = 1\ L$, donde 1 siempre es 1 o menos (porque γ siempre es 1 o mayor). Obser-0

va que no se explica cómo se derivan la ecuación de la contracción de la longitud o cualquier otra ecuación. Sólo se enuncian las ecuaciones como "guías de razonamiento" sobre las ideas de la relatividad especial.

poco más de un año cuando llegan a la estrella. Un conjunto de observadores dice que eso se debe a la contracción de la longitud; el otro conjunto dice que se debe a la dilatación del tiempo. Ambos tienen razón.

Si los viajeros espaciales alguna vez pudieran impulsarse a rapideces relativistas, encontrarían que las partes distantes del Universo se acercan más por la contracción del espacio, mientras que los observadores en la Tierra verían que los astronautas cubrirían una mayor distancia porque envejecerían más lento.

F I G U R A 3 5 . 2 4

P U N T O D E C O N T R O L

En el marco de referencia de tu metro,

Un cartel rectangular en el espacio tiene las dimensiones 10 m × 20 m.

su longitud es 1 m. Los observadores en

¿Qué tan rápido, y en qué dirección con respecto al letrero, un viajero espa-un marco de referencia en movimiento

ven tu metro contraído, mientras tú ves

cial tendría que pasar para que el cartel se viera cuadrado?

su metro contraído. Los efectos de la

relatividad siempre se atribuyen al otro

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

individuo.

El viajero espacial tendría que viajar a 0.87 c en una dirección paralela al lado más largo del cartel.

35.7 Cantidad de movimiento relativista

Recuerda el estudio de la cantidad de movimiento en el Capítulo 6. Aprendiste que el cambio en la cantidad de movimiento mv de un objeto es igual al impulso Ft que se le aplica: Ft = mv, o Ft = p, donde p = mv. Si aplicas más impulso a un objeto que tiene libertad para moverse, el objeto adquiere más cantidad de movimiento. Duplica el impulso y la cantidad de movimiento se duplica. Aplica 10 veces el impulso y el objeto gana 10 veces más cantidad de movimiento. ¿Esto significa que la cantidad de movimiento puede aumentar sin ningún límite? La respuesta es sí. ¿Esto significa que la rapidez también puede aumentar sin ningún límite? ¡La respuesta es no! El límite de rapidez de la naturaleza para los objetos materiales es c.

Para Newton, una cantidad de movimiento infinita significaría una masa infinita o una rapidez infinita. Pero no es así en la relatividad. Einstein demostró que se necesitaba una nueva definición de cantidad de movimiento. Ésta es:

p 5 γ mv

donde γ es el factor de Lorentz (recuerda que γ siempre es 1 o mayor). Esta definición generalizada de la cantidad de movimiento es válida en todos los marcos de referencia que se mueven de manera uniforme. La cantidad de movimiento relativista es mayor que mv por un factor de γ. Para rapideces cotidianas mucho menores que c, γ es casi igual a 1, de modo que p es casi igual a mv. La definición de Newton de la cantidad de movimiento es válida para rapideces bajas. A rapideces más altas, γ crece de manera impresionante, e igual lo hace la cantidad de movimiento relativista. Conforme la rapidez tiende a c,

¡γ tiende al infinito! Sin importar cuán cerca de c se empuje un objeto, éste todavía necesitaría un impulso infinito para darle la última pizca de rapidez necesaria para alcanzar c

—evidentemente imposible—. En consecuencia, se ve que ningún cuerpo con masa F I G U R A 35. 25

puede ser empujado a la rapidez de la luz, mucho menos por encima de ella.

El Acelerador Lineal de Stanford mide

Lo habitual es que las partículas subatómicas sean empujadas hasta casi alcanzar la ra- 3.2 km de largo. Pero para los elec-pidez de la luz. Las cantidades de movimiento de tales partículas pueden ser miles de veces trones que se mueven a través de él a mayores de lo que predice la expresión newtoniana. De manera clásica, las partículas se 0.99999999995 c, el acelerador mide sólo 3.2 cm de largo. Los electrones

comportan como si sus masas aumentaran con la rapidez. Einstein en un inicio apoyó esta comienzan su viaje en el primer plano de interpretación y luego cambió de parecer para mantener constante la masa, una propiedad la imagen y chocan contra objetivos, o de la materia que es la misma en todos los marcos de referencia. De modo que es γ la que de lo contrario se estudian, en las áreas cambia con la rapidez, no la masa. El aumento de la cantidad de movimiento de una par- experimentales que están al otro lado de tícula a gran rapidez es evidente en el aumento de la "rigidez" de su trayectoria. Mientras la autopista (cerca de la parte superior más cantidad de movimiento tenga, más "rígida" es su trayectoria y es más difícil desviarla. de la fotografía).

F I G U R A 3 5 . 2 6

Si la cantidad de movimiento de los

electrones fuera igual al valor newtonia-

Pantalla de

no mv, el haz seguiría la línea punteada.

detección

Electroimanes

Pero, dado que la cantidad de movi-

miento relativista mv es mayor, el haz

sigue la trayectoria "más rígida" que se

muestra con la línea sólida.

Haz de electrones

Esto se observa cuando un haz de electrones se dirige hacia un campo magnético. Las partículas cargadas que se mueven en un campo magnético experimentan una fuerza que las desvía de sus trayectorias normales. Para una cantidad de movimiento pequeña, la trayectoria se curva de manera notoria. Para una cantidad de movimiento grande, hay mayor rigidez y la trayectoria se dobla menos (Figura 35.26). Aun cuando una partícula pueda moverse sólo un poco más rápido que otra (por decir, 99.9% de la rapidez de la luz en lugar de 99% de la rapidez de la luz) su cantidad de movimiento será mucho mayor y seguirá una trayectoria más recta en el campo magnético. Esta rigidez debe compensarse en aceleradores circulares como los ciclotrones o los sincrotrones, donde la cantidad de movimiento dicta el radio de curvatura. En el acelerador lineal que se muestra en la Figura 35.25, el haz de partículas viaja en una trayectoria en línea recta y el cambio en la cantidad de movimiento no produce desviaciones respecto de una trayectoria en línea recta. Las desviaciones ocurren cuando el haz de electrones se dobla en el puerto de salida mediante imanes, como se indica en la Figura 35.26. Sin importar el tipo de acelerador de partículas, los físicos que trabajan con partículas subatómicas todos los días confirman que la definición relativista de la cantidad de movimiento y el límite de rapidez impuesto por la naturaleza son

correctos.

En resumen, se ve que, conforme la rapidez de un objeto se aproxima a la rapidez de la luz, su cantidad de movimiento tiende al infinito, lo cual significa que no hay forma de alcanzar la rapidez de la luz. Sin embargo, existe al menos una cosa que alcanza la rapidez de la luz: ¡la luz misma! Pero los fotones de luz no tienen masa y las ecuaciones que se aplican a el os son diferentes. La luz siempre viaja con la misma rapidez. De modo que, es interesante que una partícula material nunca pueda llevarse a la rapidez de la luz y la luz nunca puede llevarse al reposo.

35.8 Masa, energía y E 5 mc 2

Einstein relacionó no sólo el espacio y el tiempo, sino también la masa y la energía. Un pedazo de materia, incluso en reposo y que no interactúa con nada más, tiene una "energía de ser". A ésta se le llama energía en reposo. Einstein concluyó que se necesita energía para hacer masa y que se libera energía si la masa desaparece. La cantidad de energía E se relaciona con la cantidad de masa m por la más célebre ecuación del siglo XX: E 5 mc 2

La c 2 es el factor de conversión entre las unidades de energía y las unidades de masa.

Debido a la gran magnitud de c, a una masa pequeña le corresponde una enorme cantidad de energía.7

Recuerda del Capítulo 34 que reducciones diminutas de la masa nuclear tanto en la fisión nuclear como en la fusión nuclear producen una enorme liberación de energía, F I G U R A 3 5 . 2 7

todo en concordancia con E = mc 2. Para el público general, E = mc 2 es sinónimo de ener-Decir que una planta eléctrica sumi-

gía nuclear. Si tuvieras que pesar una planta nuclear completamente abastecida de com-nistra 90 millones de megajoules de

bustible y luego la pesaras de nuevo una semana después, descubrirías que pesa un poco energía a sus consumidores equivale a

menos: cerca de 1 gramo menos por cada kilogramo de combustible que experimentó decir que suministra 1 gramo de energía

a sus consumidores, porque la masa y la

fisión en dicha semana. Parte de la masa del combustible se convirtió en energía. Ahora, energía son equivalentes.

es muy interesante que, si pesaras una planta eléctrica de carbón y todo el carbón y el 7Cuando c está en metros por segundo y m está en kilogramos, E estará en joules. Si la equivalencia de masa y energía se hubiera entendido hace mucho tiempo, cuando los conceptos de la física comenzaban a formularse, probablemente no habría unidades separadas para la masa y la energía. Más aún, con una redefinición de las unidades de espacio y tiempo, c podría ser igual a 1 y $E = mc^2$ simplemente sería $E = m$.

C A PÍ T U LO 35 T EO R Í A D E L A R EL AT I V I DA D ESP ECI A L

679

oxígeno que consume en una semana y luego la pesaras de nuevo con todo el dióxido de carbono y otros productos de combustión que se produjeran durante la semana, también descubrirías que todo ello pesa un poco menos. Una vez más, la masa se convirtió en energía. Cerca de 1 parte en mil millones se habría convertido. Recuerda esto: si ambas plantas producen la misma cantidad de energía, el cambio de masa será el mismo para ambas; no significa ninguna diferencia si la energía se libera por una conversión de masa nuclear o química. La diferencia principal se encuentra en la cantidad de energía liberada en cada reacción individual y la cantidad de masa implicada. La fisión de un solo núcleo de uranio libera 10 millones de veces más energía que la combustión de carbono para producir una sola molécula de dióxido de carbono. Por tanto, unos cuantos camiones F I G U R A 3 5 . 2 8

llenos de combustible uranio alimentarán una planta de fisión, mientras que una planta En 1 segundo, 4.5 millones de tonela-de carbón consume muchos trenes de cien vagones cargados de carbón.

das de masa se convierten en energía

Cuando enciendes una ceril a, los átomos de los fósforos de su cabeza se reordenan y se radiante en el Sol. Sin embargo, el Sol es combinan con el oxígeno del aire para formar nuevas moléculas. Las moléculas resultantes tan masivo, que en 1 millón de años sólo tienen masas muy ligeramente menores que las moléculas de los fósforos y el oxígeno por 1 diezmillonésima de la masa del Sol se separado. En términos de la masa, el todo es un poco menor que la suma de sus partes, habrá convertido en energía radiante.

en cantidades que casi no se notan. Para todas las reacciones químicas que ceden energía, existe una correspondiente reducción de masa de alrededor de 1 parte en mil mil ones.

En cuanto a las reacciones nucleares, una reducción de la masa de 1 parte en mil puede medirse directamente con varios dispositivos. Esta reducción de masa en el Sol por el proceso de fusión termonuclear baña al sistema solar con energía radiante y nutre la vida.

La etapa actual de la fusión termonuclear en el Sol ha seguido así durante los últimos 5 mil millones de años, y existe suficiente combustible hidrógeno para que la fusión dure otros 5 mil millones de años. ¡Es bueno tener un Sol del tamaño adecuado!

La ecuación E = mc 2 no se limita a reacciones químicas y nucleares. Un cambio en la energía de cualquier objeto en reposo se acompaña de un cambio en su masa. El filamento de una bombil a energizada con electricidad tiene más masa que cuando se apaga. Una taza de té caliente tiene más masa que la misma taza de té cuando está fría. Un reloj al que SCREENCAST: E mc2

se le ha dado cuerda tiene más masa que el mismo reloj cuando no tiene cuerda. Pero en estos ejemplos los cambios de masa son increíblemente pequeños, mucho muy pequeños para ser medidos. Incluso los cambios de masa mucho mayores en el cambio radiactivo no se midieron sino hasta después de que Einstein predijera la equivalencia entre la masa y la energía. Sin embargo, ahora es habitual medir las conversiones de masa en energía y de energía en masa.

Considera una moneda con una masa de 1 g. Esperarías que 2 de las mismas monedas tuvieran una masa de 2 g, que 10 monedas tuvieran una masa de 10 g y que 1,000 monedas apiladas en una caja tuvieran una masa de 1 kg. No es así si las monedas se atraen o

repelen entre sí. Imagina, por ejemplo, que cada moneda porta una carga eléctrica negativa, de modo que cada moneda repele a las otras monedas. Entonces, para meterlas por la fuerza en la caja se necesita trabajo. Este trabajo se suma a la masa del conjunto. De modo que una caja que contiene 1,000 monedas con carga negativa tiene más de 1 kg de masa.

Si, por otra parte, las monedas se atraen entre sí (como los nucleones en el núcleo se atraen mutuamente), se necesita trabajo para separarlas; entonces, una caja con 1,000 monedas tendría una masa menor a 1 kg. De modo que la masa de un objeto no necesariamente es igual a la suma de las masas de sus partes, como se sabe a partir de la medición de las masas de los núcleos. El efecto sería espectacular si pudieras lidiar con partículas cargadas que estuvieran descubiertas. Si en una esfera de 10 cm de diámetro pudieras juntar por la fuerza algunos electrones cuyas masas por separado sumaran 1 g, ¡el conjunto tendría una masa de 40 mil mil ones kg! En verdad que la equivalencia de masa y energía es significativa.

Antes de que los físicos llegaran a entender que el electrón es una partícula fundamental sin un radio mensurable, algunos especulaban que tenía un tamaño determinado y que su masa era simplemente una medida de cuánto trabajo se necesitaba para comprimir su carga a dicho tamaño.8

8John Dobson, miembro de la organización de San Francisco Sidewalk Astronomers, especulaba que, así como un reloj se vuelve más masivo cuando se realiza trabajo sobre él al darle cuerda contra la resistencia de su resorte, la masa de todo el Universo no es más que la energía que se destine a darle cuerda contra la gravitación mutua.

De acuerdo con este punto de vista, la masa del Universo es equivalente al trabajo realizado para separarlo.

680

PA R T E O C H O

R EL AT I V I DA D

En unidades de medición ordinarias, la rapidez de la luz c es una cantidad grande y su cuadrado es todavía más grande; por tanto, una pequeña cantidad de masa almacena una gran cantidad de energía. La cantidad c 2 es un "factor de conversión": convierte la medición de la masa a la medición de energía equivalente. O es la razón entre la energía en reposo y la masa: E/ m = c 2. Que aparezcan en cualquier forma de esta ecuación no tiene nada que ver con la luz y nada que ver con el movimiento. La magnitud de c 2

es 90 mil billones (9 3 1016) J/kg. Un kilogramo de materia tiene una "energía de ser"

igual a 90 mil billones de J. Incluso una motita de materia con una masa de sólo 1 mg tiene una energía en reposo de 90 mil millones de J.

La ecuación E = mc 2 es más que una fórmula para convertir masa en otros tipos de energía, o viceversa. Indica más que eso: que la

energía y la masa son la misma cosa. La masa es energía condensada. Si quieres saber cuánta energía hay en un sistema, mide E 5 mc 2 indica que la energía y la

su masa. Para un objeto en reposo, su energía es su masa (llamada su energía de masa masa están relacionadas. La masa

en reposo), y con movimiento su energía es todavía mayor. La energía, al igual que la es energía condensada.

masa, muestra inercia. Agita un objeto masivo de ida y vuelta; es la energía en sí la que es difícil agitar.

La primera evidencia de la conversión de energía radiante en masa la proporcionó, en 1932, el físico estadounidense Carl Anderson. Él descubrió el positrón por la traza que dejó en una cámara de niebla. El positrón es la antipartícula del electrón, igual en masa y espín al electrón pero con carga opuesta. Cuando un fotón de alta frecuencia se acerca a un núcleo atómico, puede crear un electrón y un positrón juntos como un par y, por tanto, crea masa. Las partículas creadas se separan. El positrón no es parte de la materia normal porque vive muy poco tiempo. En cuanto encuentra un electrón, el par se aniquila, lo que envía dos rayos gamma en el proceso. Entonces la masa se convierte de nuevo en energía radiante.9

P U N T O D E C O N T R O L

¿Se puede ver la ecuación E = mc2 en otra forma y decir que la materia se transforma en energía pura cuando viaja a la rapidez de la luz al cuadrado?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

¡No, no, no! La materia no puede ponerse en movimiento a la rapidez de la luz, mucho menos a la rapidez de la luz al cuadrado (¡que no es una rapidez!). La ecuación E = mc 2

simplemente significa que la energía y la masa son "dos lados de la misma moneda".

35.9 Principio de correspondencia

El principio de correspondencia se introdujo en el Capítulo 32. Recuerda que indica que cualquier nueva teoría o cualquier nueva descripción de la naturaleza deben concordar con la anterior, donde la anterior dio resultados correctos. Si las ecuaciones de la

relatividad especial son válidas, entonces deben corresponder con aquellas de la me-SCREENCAST: Principio de

cánica clásica cuando se consideran rapideces mucho menores que la rapidez de la luz.

correspondencia

9Recuerda que la energía de un fotón es E = hf, y que la energía de masa de una partícula es E = mc 2. Los fotones de alta frecuencia rutinariamente convierten su energía en masa cuando producen pares de partículas en la naturaleza, y en los aceleradores, donde los procesos pueden observarse. ¿Por qué pares? Sobre todo porque ésta es la única forma en la que no se viola la conservación de carga. De modo que, cuando se crea un electrón, también se crea una antipartícula positrón. Al igualar las dos ecuaciones, hf = 2 mc 2, donde m es la masa de una partícula (o antipartícula), se observa que la frecuencia mínima de un rayo gamma para la producción de un par de partículas es f = 2 mc 2/ h.

C A PÍ T U LO 35 R E V ISI Ó N

681

Las ecuaciones de la relatividad para el tiempo, la longitud y la cantidad de movimiento son:

t

$t =$

0

$= t$

2

0

v

$1 - 2$

c

2

v

L = L 1

L

0

−

=

2

0

c

mv

p =

= mv

2

v

1− 2

c

Observa que cada una de estas ecuaciones se reduce a los valores newtonianos para rapideces que son muy pequeñas comparadas con c. Entonces la razón v 2/ c 2 es muy pequeña y, para rapideces cotidianas, pueden considerarse como cero. Las ecuaciones relativistas se convierten en:

t

t =

0

= t

1− 0

0

L = L 1 − 0 L

0

= 0

mv

p =

= mv

Qué bien que las ecuaciones de

1 − 0

Einstein para el tiempo, la longi-

tud y la cantidad de movimiento

De modo que, para rapideces cotidianas, la cantidad de movimiento, la longitud y correspondan a sus expresiones

el tiempo de los objetos en movimiento en esencia no cambian. Las ecuaciones de la clásicas para rapideces cotidianas.

relatividad especial se sostienen para todas las rapideces, aunque difieren mucho de las ecuaciones clásicas sólo para rapideces cercanas a la rapidez de la luz.

La teoría de la relatividad de Einstein ha planteado muchas preguntas filosóficas. Exactamente, ¿qué es el tiempo? ¿Puede decirse que la forma natural de verlo es que nada ocurre al mismo tiempo? ¿Y por qué el tiempo parece moverse sólo en una dirección? ¿Siempre se ha movido hacia adelante? ¿Existen otras partes en el Universo donde el tiempo se mueve hacia atrás? ¿Es probable que la percepción tridimensional de un mundo tetradimensional sólo sea un comienzo? ¿Podría haber una quinta dimensión? ¿Una sexta dimensión? ¿Una séptima dimensión? Y si así fuera, ¿cómo sería la naturaleza de estas dimensiones? Tal vez estas preguntas sin respuesta puedan responderlas los físicos del mañana. ¡Qué emocionante!

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)
Marco de referencia. Lugar (por lo general un conjunto de

necesariamente son simultáneos en un marco que se mueve

ejes coordenados) con respecto al cual pueden describirse la

con respecto al primer marco.

posición y el movimiento.

Espacio-tiempo. El continuo tetradimensional en el cual

Postulados de la teoría de la relatividad especial. (1) Todas las tienen lugar todos los eventos y existen todas las cosas. Tres

leyes de la naturaleza son las mismas en todos los marcos de

dimensiones son las coordenadas del espacio, y la cuarta es

referencia que se mueven de manera uniforme. (2) La rapidez

el tiempo.

de la luz en el espacio libre tiene el mismo valor medido sin

Dilatación del tiempo. La lentificación del tiempo para un objeto importar el movimiento de la fuente o el movimiento del

en movimiento, medido por quienes ven su movimiento.

observador; esto es: la rapidez de la luz es constante.

Contracción de la longitud. La contracción del espacio en la Simultaneidad. Ocurrencia al mismo tiempo. Dos eventos

dirección de movimiento de un observador como resultado

que son simultáneos en un marco de referencia no

de la rapidez.

682

PA R T E O C H O

R EL AT I V I DA D

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N) 35.1 El movimiento es relativo

19. Si una fuente de luz que destella se mueve hacia ti

1. Si caminas a 1 km/h por el pasillo hacia el frente de

suficientemente rápido como para que el intervalo de

un tren que se mueve a 60 km/h, ¿cuál es tu rapidez en

tiempo entre destellos se reduzca a la mitad, ¿cuán largo

relación al suelo?

será el intervalo de tiempo entre destellos si la fuente se

2. En la pregunta anterior, ¿tu rapidez aproximada en

aleja de ti con la misma rapidez?

relación al Sol mientras caminas por el pasillo del tren

20. ¿Cuántos marcos de referencia experimenta el gemelo que

cambió un poco o mucho?

queda en casa en el viaje del gemelo? ¿Cuántos marcos de

3. ¿Qué hipótesis planteó G. F. FitzGerald para explicar los

referencia experimenta el gemelo viajero?

hallazgos de Michelson y Morley?

35.5 Suma de velocidades

4. ¿Qué idea clásica acerca del espacio y del tiempo rechazó

21. ¿Cuál es el valor máximo de v v / c 2 en una situación Einstein?

1 2

extrema? ¿Cuál es el valor más pequeño?

35.2 Postulados de la teoría de la relatividad especial

22. ¿La regla relativista

5. ¿Qué es lo que se mantiene igual en el primer postulado

$v + v$

1

2

$V =$

de Einstein?

v v

1

1 2

$+ 2$

6. ¿Qué es constante en el segundo postulado de Einstein?

c

es consistente con el hecho de que la luz puede tener

35.3 Simultaneidad

sólo una rapidez en todos los marcos de referencia que se

7. En el interior del compartimiento en movimiento de la

mueven de manera uniforme?

Figura 35.4, la luz recorre cierta distancia hacia el extremo

23. ¿Cuáles dos principales obstáculos impiden viajar hoy a

frontal y cierta distancia hacia el extremo posterior del

través de la galaxia con rapideces relativistas?

compartimiento. ¿Cómo se comparan estas distancias vistas

en el marco de referencia de la nave en movimiento?

24. ¿Cuál es el estándar universal del tiempo?

8. ¿Cómo se comparan las distancias de la pregunta 7 vistas

35.6 Contracción de la longitud

en el marco de referencia de un observador en un planeta

25. ¿Qué longitud aparentaría tener un metro si viajara como una

estacionario?

lanza arrojada adecuadamente a 99.5% de la rapidez de la luz?

35.4 El espacio-tiempo y la dilatación del tiempo

26. ¿Qué longitud aparentaría tener el metro de la pregunta

9. ¿Cuántos ejes coordenados se utilizan generalmente para

anterior si viajara con su longitud perpendicular a

describir el espacio tridimensional? ¿Qué es lo que mide

su dirección de movimiento? (¿Por qué tu respuesta

la cuarta dimensión?

es diferente de tu respuesta a la pregunta anterior?)

10. ¿Bajo qué condiciones tú y un amigo compartirán

27. Si viajaras en una nave con gran rapidez, ¿los metros a

el mismo reino de espacio-tiempo? ¿Cuándo no

bordo te parecerían contraídos? Defiende tu respuesta.

compartirán el mismo reino?

35.7 Cantidad de movimiento relativista

11. ¿Qué hay de especial acerca de la razón entre la distancia

28. ¿Cuál sería la cantidad de movimiento de un objeto si se

recorrida por un destello de luz y el tiempo que la luz

moviera con la rapidez de la luz?

tarda en recorrer esta distancia?

29. Cuando un haz de partículas cargadas atraviesa un campo

12. Se necesita tiempo para que la luz viaje por una trayectoria

magnético, ¿cuál es la evidencia de que las partículas del haz

de un punto a otro. Si esta trayectoria se ve más larga debido

tienen cantidades de movimiento mayores que el valor mv?

al movimiento, ¿qué ocurre con el tiempo que tarda la luz

en recorrer esta trayectoria más larga?

35.8 Masa, energía y E 5 mc 2

13. ¿Cómo se le llama al "estiramiento" del tiempo?

30. Compara las cantidades de masa convertida en energía en

14. ¿Cuál es una expresión algebraica para el factor de

las reacciones nucleares y en las reacciones químicas.

Lorentz (gamma)? ¿Por qué nunca es menor que 1?

31. ¿Cómo se compara la energía de la fisión de un solo

15. ¿Cómo difieren las mediciones de tiempo para eventos en

núcleo de uranio, con la energía de la combustión de un

un marco de referencia que se mueve a 50% de la rapidez

solo átomo de carbono?

de la luz con respecto a ti? ¿A 99.5% de la rapidez de la

32. ¿La ecuación E = mc 2 se aplica a las reacciones químicas?

luz con respecto a ti?

33. ¿Cómo es que E = mc 2 describe las identidades de la 16. ¿Cuál es la evidencia de la dilatación del tiempo?

energía y la masa?

17. Cuando una luz que destella se aproxima hacia ti, cada

35.9 Principio de correspondencia

destello que llega a ti tiene una distancia más corta que

recorrer. ¿Qué efecto tiene esto sobre la frecuencia con la

34. ¿De qué manera el principio de correspondencia se

que recibes los destellos?

relaciona con la relatividad especial?

18. Cuando una fuente de luz que destel a se aproxima a ti,

35. ¿Las ecuaciones de la relatividad para el tiempo, la

¿aumenta la rapidez de la luz o la frecuencia de la luz, o

longitud y la cantidad de movimiento siguen siendo

ambas?

verdaderas para rapideces cotidianas? Explica.

C A PÍ T U LO 35 R E V ISI Ó N

683

P I E N S A Y R E A L I Z A (A P L I C A C I Ó N M A N U A L) 36. Llama a la abuela y explícale cómo las teorías de relatividad

mundo. Cuéntale cómo estas ideas te motivan a conocer más

de Einstein tienen que ver con lo rápido y lo grande: que la

del Universo. Impresiona a la abuela usando adecuadamente

relatividad no es sólo “al á afuera”, sino también afecta este

las palabras ahí, existen y sus en tu explicación.

P I E N S A Y R E S U E L V E (A P L I C A C I Ó N M A T E M Á T I C A) Recuerda de este capítulo que el factor gamma (g) rige tanto la 41. De acuerdo con la mecánica newtoniana, la cantidad

dilatación del tiempo como la contracción de la longitud, donde

de movimiento del autobús del problema anterior es

p = mv. De acuerdo con la relatividad, es p = g. ¿Cómo se

=

1

compara la cantidad de movimiento real del autobús que

2

v

1 − (

)

se mueve a 0.99 c, con la cantidad de movimiento que

(2

c))

tendría si fuera válida la mecánica clásica? ¿Cómo se

Cuando multiplicas el tiempo en un marco en movimiento por g , compara la cantidad de movimiento de un electrón que

obtienes el tiempo más largo (dilatado) en tu marco fijo. Cuando

viaja a 0.99 c con su cantidad de movimiento clásica?

divides entre g la longitud en un marco en movimiento, obtienes 42. El autobús del problema anterior mide 70 pies de largo,

la longitud más corta (contraída) en tu marco fijo.

de acuerdo con sus pasajeros y su conductor. Demuestra

37. Imagina una nave espacial con gran rapidez equipada con

que su longitud, vista desde un punto en un planeta fijo,

una fuente de luz que destel a. Si la frecuencia de los destel os

es un poco menor que 10 pies.

vistos en una nave que se aproxima es del doble de lo que era

43. Si el autobús del problema 40 disminuyera su rapidez hasta un
cuando la nave estaba a una distancia fija, ¿en cuánto cambió
“mero” 10% de la rapidez de la luz, demuestra que la siesta del
el periodo (intervalo de tiempo entre destel os)? ¿Este periodo
pasajero tendría una duración un poco mayor a 5 minutos.
es constante para una rapidez relativa constante? ¿Para un
44. Si el conductor del autobús del problema 40 decide
movimiento acelerado? Defiende tu respuesta.
conducir a 99.99% de la rapidez de la luz para ganar algo
38. Una nave estelar pasa la Tierra a 80% de la rapidez de la
de tiempo, demuestra que tú medirías la longitud del
luz y envía un dron hacia adelante a la mitad de la rapidez
autobús en poco menos que 1 pie.
de la luz con respecto a sí misma. Demuestra que el dron
45. Supón que los taxis cohete del futuro se mueven alrededor
viaja a 93% de la rapidez de la luz con respecto a la Tierra.
del sistema solar a la mitad de la rapidez de la luz. Por un viaje
39. Imagina que la nave del problema anterior de algún
de 1 hora, medido por un reloj en el taxi, a un conductor
modo viaja a c con respecto a la Tierra y dispara un
se le pagan 10 estelares. El sindicato de conductores de taxi
dron hacia adelante con una rapidez c con respecto a
exige que el pago se base en el tiempo de la Tierra y no en el
ella misma. Usa la ecuación de la suma relativista de

tiempo del taxi. Si esta demanda se satisface, demuestra que

velocidades para demostrar que la rapidez del dron con

el nuevo pago por el mismo viaje sería de 11.5 estelares.

respecto a la Tierra sigue siendo c.

46. El cambio fraccional de reaccionar masa a energía en un

40. Un pasajero en un autobús interplanetario expreso que

reactor de fisión es de alrededor de 0.1%, o 1 parte en mil.

viaja a $v = 0.99$ c duerme una siesta de 5 minutos, de

Por cada kilogramo de uranio que se fisiona en su totalidad,

acuerdo con su reloj. Demuestra que su siesta, desde un

¿cuánta energía se libera? Si la energía cuesta 3 centavos de

lugar en un planeta fijo, dura 35 minutos.

dólar por megajoule, ¿cuánto vale esta energía en dólares?

P I E N S A Y C L A S I F I C A (A N Á L I S I S)

47. Unos electrones se disparan con diferentes rapideces,

48. Para un observador en la Tierra, los metros en tres naves

atraviesen un campo magnético y se doblan de sus

espaciales tienen las siguientes longitudes. Clasifica las

trayectorias en línea recta para golpear el detector en los

rapideces de las naves espaciales con respecto a la Tierra,

puntos mostrados. Clasifica las rapideces de los electrones,

de la más alta a la más baja.

de la más alta a la más baja.

A

B

C

C

A B

P I E N S A Y E X P L I C A (S Í N T E S I S)

49. Si estuvieras en un tren que viaja con suavidad, sin

62. ¿Es posible, en principio, que un ser humano, quien tiene

ventanas, ¿podrías percibir la diferencia entre un

una esperanza de vida de 70 años, pueda hacer un viaje

movimiento uniforme y el reposo? ¿Entre un movimiento

redondo a una parte del Universo a miles de años-luz de

acelerado y el reposo? Explica cómo podrías hacer tal

distancia? Explica.

distinción con un tazón lleno de agua.

63. Una gemela, quien realiza un largo viaje con rapideces

50. Una persona que viaja en el techo de un vagón lanza

relativistas, regresa más joven que su hermana quien

una bola hacia adelante. (a) Si ignoras el arrastre

permaneció en casa. ¿Podría ella regresar antes de que

aerodinámico y con relación al suelo, ¿la bola se mueve

haya nacido su hermana gemela? Defiende tu respuesta.

más rápido o más lento cuando el tren se mueve que

64. ¿Es posible que un hijo sea biológicamente más viejo que

cuando está quieto? (b) Con respecto al vagón, ¿la bola se

sus padres? Explica.

mueve más rápido o más lento cuando el tren se mueve

65. Si estuvieras en una nave espacial que se aleja de la Tierra

que cuando el tren está quieto?

con una rapidez cercana a la rapidez de la luz, ¿qué

51. Ahora imagina que la persona que está encima del vagón

cambios observarías en tu pulso? ¿En tu volumen? Explica.

envía el haz de luz de un reflector en la dirección en que

66. Si estuvieras en la Tierra monitorizando a una persona en

viaja el tren. Compara la rapidez del haz de luz con respecto

una nave espacial que se aleja de la Tierra con una rapidez

al suelo cuando el tren está en reposo y cuando está en

cercana a la rapidez de la luz, ¿qué cambios observarías en

movimiento. ¿Cómo difiere el comportamiento del haz de

su pulso? ¿En su volumen? Explica.

luz del comportamiento de la bola del problema 50?

67. Debido a la contracción de la longitud, ves a las personas

52. Cuando conduces por la autopista, te mueves a través del

en una nave espacial que pasa junto a ti un poco más

espacio. ¿A través de qué más te estás moviendo?

pequeñas de lo que normalmente se ven. ¿Cómo te ven

53. En el Capítulo 26 aprendiste que la luz viaja más lento

estas personas?

en el vidrio que en el aire. ¿Esto contradice el segundo

68. Debido a la dilatación del tiempo, observas que las

postulado de Einstein?

manecillas del reloj de tu amigo se mueven con lentitud.

54. Los astrónomos ven la luz proveniente de galaxias

¿Cómo ve tu amigo tu reloj: que avanza con lentitud, con

distantes que se alejan de la Tierra con rapideces mayores

rapidez o ninguno de los anteriores?

que 10% de la rapidez de la luz. ¿Qué tan rápido llega

69. ¿La ecuación de la dilatación del tiempo muestra que la

esta luz a los telescopios de los astrónomos?

dilatación ocurre con todas las rapideces, ya sean lentas o

55. El haz de luz proveniente de un láser en una tornamesa

rápidas? Explica.

giratoria se proyecta en el espacio. A cierta distancia, el

70. Si vivieras en un mundo donde las personas

haz se mueve a través del espacio más rápido que c. ¿Por

acostumbraran viajar con rapideces cercanas a la rapidez

qué esto no contradice la relatividad?

de la luz, ¿por qué sería arriesgado hacer una cita con el

56. ¿Un haz de electrones puede barrer a través de la cara de

dentista a las 10 de la mañana del próximo jueves?

un tubo de rayos catódicos con una rapidez mayor que la

71. ¿Cómo se comparan las densidades medidas de un

rapidez de la luz? Explica.

cuerpo en reposo y en movimiento?

57. El evento A ocurre antes que el evento B en cierto marco

72. Si observadores estacionarios miden la forma de un objeto

de referencia. ¿De qué manera el evento B podría ocurrir

en movimiento que pasa y señalan que es exactamente

antes que el evento A en algún otro marco de referencia?

circular, ¿cuál es la forma del objeto cuando lo ven de

58. Si dos relámpagos golpean exactamente el mismo lugar

frente observadores a bordo del objeto, viajando con él?

exactamente al mismo tiempo en un marco de referencia, ¿es

73. La fórmula que relaciona la rapidez, la frecuencia y la

posible que observadores en otros marcos vean los relámpagos

longitud de onda de las ondas electromagnéticas, $v = f$, golpear en diferentes momentos o en diferentes lugares?

se conocía antes de desarrollarse la relatividad. La relati-

59. Supón que la bombilla de la nave de las Figuras 35.4 y

vidad no ha cambiado esta ecuación, pero le agregó una

35.5 está más cerca del frente que de la parte posterior

nueva característica. ¿Cuál es esta característica?

del compartimiento, de modo que el observador en la nave

74. La luz se refleja en un espejo en movimiento. ¿Cómo

ve la luz que llega al extremo frontal antes de llegar

difiere la luz reflejada de la luz incidente, y en qué es igual?

al extremo posterior. ¿Todavía es posible que el observador

exterior vea que la luz llegue primero al extremo posterior?

75. Conforme un metro pasa junto a ti, tus mediciones

muestran que su cantidad de movimiento es el doble que

60. Dado que existe un límite superior para la rapidez

su cantidad de movimiento clásica y su longitud es de

de una partícula, ¿se deduce que también existe un

1 m. ¿En qué dirección apunta el metro?

límite superior para su cantidad de movimiento y, en

consecuencia, para su energía cinética? Explica.

76. En el ejercicio anterior, si el metro se mueve en una

dirección a lo largo de su longitud (como una lanza arrojada

61. La luz recorre cierta distancia en, por decir, 20,000 años.

de manera adecuada), ¿qué tan larga medirías su longitud?

¿Cómo es posible que un astronauta, que viaja más lento

que la luz, pueda llegar tan lejos en 20 años de su vida, si

77. Si una nave espacial a gran rapidez parece encogerse a

la luz la recorre en 20,000 años?

la mitad de su longitud normal, ¿cómo se compara

su cantidad de movimiento con la fórmula clásica $p = mv$*?*

C A PÍ T U LO 35 R E V ISI Ó N

685

78. ¿Cómo es que la cantidad de movimiento de una

82. ¿Cómo puede aplicarse la idea del principio de

partícula puede aumentar 5% con sólo un aumento de

correspondencia fuera del campo de la física?

1% en su rapidez?

83. ¿Qué significa la ecuación E = mc 2?

79. El acelerador lineal de 2 millas de la Universidad de

84. De acuerdo con E = mc 2, ¿cómo se compara la cantidad de Stanford, en California, "parece" ser de menos de un

energía en un kilogramo de plumas, con la cantidad

metro de largo para los electrones que viajan en él. Explica.

de energía en un kilogramo de hierro?

80. En el acelerador de Stanford, los electrones terminan su

85. ¿Una batería de linterna completamente cargada pesa más que

viaje con una energía miles de veces mayor que su energía

la misma batería cuando se agota? Defiende tu respuesta.

en reposo inicial. En teoría, si pudieras viajar con el os,

86. Cuando miras el Universo, ves hacia el pasado.

¿observarías un aumento en su energía? ¿En su cantidad de

John Dobson, fundador del San Francisco Sidewalk

movimiento? En tu marco de referencia en movimiento,

Astronomers, afirma que uno ni siquiera puede ver ahora

¿cuál sería la rapidez aproximada del blanco al que se dirigen?

el dorso de sus manos; de hecho, no puede ver nada

81. Los electrones que iluminan la pantalla en el cinescopio

ahora. ¿Estás de acuerdo? Explica.

de los televisores antiguos viajaban casi a un cuarto de

87. Elabora cuatro preguntas de opción múltiple, cada una que

la rapidez de la luz y tenían casi 3% más energía que los

compruebe que un compañero de clase comprende (a) la

hipotéticos electrones no relativistas que viajan con la

dilatación del tiempo, (b) la contracción de la longitud, (c)

misma rapidez. ¿Este efecto relativista tiende a aumentar

la cantidad de movimiento relativista y (d) $E = mc^2$.

o disminuir la cuenta de luz?

P I E N S A Y D I S C U T E (E V A L U A C I Ó N)

88. La idea de que la fuerza causa aceleración no parece

94. Dos alfileres de seguridad, idénticos excepto que uno

extraña. Ésta y otras ideas de la mecánica newtoniana

está cerrado y el otro no, se colocan en baños ácidos

son consistentes con la experiencia cotidiana. Pero las

idénticos. Después de que los alfileres se disuelven, ¿qué

ideas de la relatividad sí parecen extrañas y más difíciles

es diferente acerca de los dos baños ácidos?

de comprender. Discute.

95. Un trozo de material radiactivo encerrado en un grueso

89. ¿Por qué Michelson y Morley al principio consideraron

contenedor de plomo se pone más caliente conforme

su experimento como un fracaso? (Discute ejemplos que

sus núcleos decaen y liberan energía. ¿La masa del sis-

puedas haber encontrado donde el fracaso tenga que ver,

tema trozo-contenedor cambia? Si es así, ¿aumenta o

no con la falta de habilidad, sino con la imposibilidad de

disminuye?

la tarea.)

96. Los muones son partículas elementales que se forman en

90. ¿La relatividad especial permite que algo viaje más rápido lo alto de la atmósfera por las interacciones de los rayos

que la luz? Discute.

cósmicos con los núcleos atómicos que ahí se encuentran.

91. Cuando un haz de luz se aproxima a ti, su frecuencia es

Los muones son radiactivos y tienen vidas promedio de

más alta y su longitud de onda es más corta. ¿Esto con-

alrededor de dos millonésimas de segundo. Aun cuando

tradice el postulado de que la rapidez de la luz no puede

viajan casi a la rapidez de la luz, muy pocos deberían ser

cambiar? Discute.

detectados a nivel del mar después de viajar a través de la

92. Considera la rapidez del punto donde se unen las

atmósfera. . al menos de acuerdo con la física clásica. Sin

cuchillas de una tijera cuando está cerrada. Mientras

embargo, mediciones de laboratorio demuestran que los

más cerca se cierren las cuchillas, más rápido se mueve

muones llegan en grandes cantidades a la superficie de la

el punto. En principio, el punto podría moverse más

Tierra. Discute y explica.

rápido que la luz. Lo mismo sucede con la rapidez del

97. Una de las novedades del futuro puede ser el "salto cen-

punto donde un hacha encuentra la madera cuando la

tenario", donde los ocupantes de naves espaciales de gran

hoja del hacha encuentra la madera no muy horizon-

rapidez partirían de la Tierra durante varios años y regre-

talmente; el punto de contacto viaja más rápido que el

sarían siglos después. Discute los obstáculos actuales

hacha. De igual manera, un par de haces láser que se

para tal práctica.

cruzan y se mueven hasta estar paralelos produce un

98. El enunciado del filósofo Soren Kierkegaard, de que

punto de intersección que puede moverse más rápido

"la vida sólo puede ser comprendida hacia atrás; pero

que la luz. Discute por qué estos ejemplos no contradi-

debe vivirse hacia adelante", ¿es consistente con la

cen la relatividad especial.

teoría de la relatividad especial?

93. La rapidez de la luz es un límite de rapidez en el Uni-

99. Tu compañero de estudio dice que la materia no puede

verso, al menos para el Universo tetradimensional que se

crearse ni destruirse. ¿Qué le dirías para corregir esta

entiende. Ninguna partícula material puede alcanzar o

afirmación?

sobrepasar este límite aun cuando sobre él se ejerza una

100. Discute con tus amigos cómo ocurre la contracción de

fuerza continua incesante. Analiza evidencia que res-

la longitud de un auto de carreras que viaja a 200 millas

palde esto.

por hora, pero por qué puede ignorarse la reducción.

EQ'N
$\Rightarrow H^2 = \frac{8\pi G\rho R}{3}$
CRITICAL
DENSITY

36 1

C A P Í T U L O 3 6

Teoría de la

relatividad 2

general

36.1 Principio de equivalencia

36.2 Doblamiento de la luz por la gravedad

36.3 Gravedad y tiempo: corrimiento

gravitacional al rojo

3

36.4 Gravedad y espacio: el movimiento

de Mercurio

36.5 Gravedad, espacio y una nueva geometría

36.6 Ondas gravitacionales

36.7 Gravitación newtoniana y einsteiniana

4

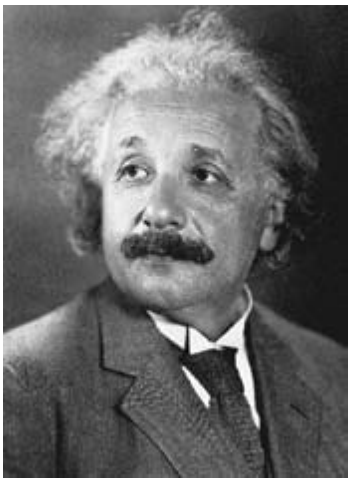
1 Cuando tu unidad GPS (Sistema de Posicionamiento Global)

te indica dónde estás, agradéceselo a Einstein. 2 Richard Crowe inicia su conferencia sobre la relatividad general con una esfera

celeste. 3 Cuando los astrofísicos hacen mediciones de eventos galácticos lejanos, se lo agradecen a Einstein. 4 Stephanie

Hewitt ilustra una predicción de la relatividad general de Einstein:

la desviación de la luz estelar por parte del Sol.



C A PÍ T U LO 3 6 T

EO R Í A D E L A R EL AT I V I DA D GEN ER A L

687

Las preocupaciones de Einstein no se limitaban a la física.

Vivió en Berlín durante la Primera Guerra Mundial y denun-

Cuando Einstein era un joven estudiante faltó a

muchas clases, prefería estudiar por su cuenta,

y en 1900, para aprobar sus exámenes, se quemó

ció el militarismo alemán de su época. Expresó públicamente

las pestañas con la ayuda de los meticulosos apuntes de un

su profunda convicción de que la guerra debía abolirse y que

amigo. Tiempo después hizo este comentario: "… después

debía fundarse una organización internacional que controla-

de aprobar el examen final, durante todo un año me rehusé

ra las disputas entre las naciones. En 1933, mientras Einstein

a pensar en ningún problema científico". Durante este año

visitaba Estados Unidos, Hitler asumió el poder. Einstein se

se convirtió en ciudadano de Suiza,

pronunció en contra de las políticas raciales de Hitler y

aceptó un puesto temporal como renunció a su puesto en la
Universidad de Berlín. Al no estar profesor de verano y ofreció
aseso-seguro ahora en Alemania, Einstein se trasladó a Estados

rías a dos estudiantes de bachil era-

Unidos y aceptó un puesto de investigación en el Instituto

to. Aconsejaba a los padres, siendo

para Estudios Avanzados en Princeton, Nueva Jersey.

él mismo profesor de bachil erato,

En 1939, un año antes de que Einstein se convirtiera en

que sacaran a los muchachos de la

ciudadano estadounidense, y después de que los científicos

escuela, donde, afirmó, su curio-

alemanes consiguieron fisionar un átomo de uranio, varios

sidad natural se iba extinguiendo. prominentes científicos húngaro-estadounidenses lo exhor-El trabajo de Einstein como tutor taron a escribir la famosa carta al presidente Roosevelt donde duró poco tiempo.

señalaba las posibilidades científicas de una bomba nuclear.

No fue sino hasta dos años después de su graduación Einstein era pacifista, pero la idea de que Hitler desarrol ara que Einstein consiguió un empleo estable, como analista de

tal bomba lo impulsó a actuar. El resultado fue la construc-

patentes en la Oficina Suiza de Patentes, en Berna. Einstein

ción de la primera bomba nuclear, la cual, irónicamente, se

conservó este empleo durante más de siete años. Encontró

detonó en Japón después de la caída de Alemania.

el trabajo bastante interesante, y en ocasiones estimulaba su

Einstein creía que el Universo era indiferente a la condi-

imaginación científica, pero principalmente lo liberaba de ción humana y afirmó que, para que la humanidad pudiera preocupaciones financieras y le daba tiempo de reflexionar

continuar, debía crearse un orden moral. Abogó intensamen-

sobre los problemas de la física que lo intrigaban.

te por la paz mundial a través del desarme nuclear. Las bom-

Sin conexiones académicas de ningún tipo y, en esencia,

bas nucleares, remarcó Einstein, cambiaron todo menos la

sin ningún contacto con otros físicos, trazó los ejes principa-

forma de pensar.

les a lo largo de los cuales se desarrol aría la física teórica del

El filósofo de la ciencia, C. P. Snow, quien conoció a

siglo XX. En 1905, a la edad de 26 años, obtuvo su docto-

Einstein, dijo de él, en una reseña de The Born–Einstein

rado en física y publicó cuatro artículos fundamentales. El

Letters, 1916-1955 (Epistolario Born-Einstein, 1916-1955):

primero fue acerca de la teoría cuántica de la luz e incluía

"Einstein fue la mente más poderosa del siglo XX y una de las

una explicación del efecto fotoeléctrico, por el cual ganó el

más poderosas que ha existido jamás. Él era más que eso. Era

Premio Nobel de Física en 1921. El segundo artículo aborda-

un hombre con una gran personalidad, y quizá sobre todo,

ba los aspectos estadísticos de la teoría molecular y el movi-

de estatura normal. […] He conocido a muchas personas a

miento browniano, una prueba de la existencia de los átomos.

quienes el mundo llama grandes; de el as, él fue por mucho,

Su tercer y más famoso artículo fue acerca de la relatividad

por un orden de magnitud, el más impresionante. Él fue

especial. En un cuarto artículo presentó la famosa E 5 mc 2.

—a pesar de la calidez, la humanidad, el toque de humor—

Luego vinieron diez años de intenso trabajo, que condu-

el hombre más diferente de todos".

jeron en 1915 a la teoría de la relatividad general, con la cual

Einstein fue más que un gran científico; fue un hom-Einstein

presentaba una nueva teoría de la gravitación que

bre con disposición y sin pretensiones, con una profunda

incluía la teoría de Newton como un caso especial. Estos preocupa ción por el bienestar del prójimo. La elección de artículos vanguardistas tuvieron una enorme influencia en el

Einstein como persona del siglo por la revista Time al final

curso de la física moderna.

del siglo XX fue la más acertada, e incontrovertible.

36.1 Principio de equivalencia

En 1905 Einstein postuló que ninguna observación realizada dentro de una cámara cerrada podría determinar si la cámara está en reposo o en movimiento con velocidad constante; esto es: ninguna medición mecánica, eléctrica, óptica o de cualquier otra SCREENCAST: Principio

índole física que uno pudiera realizar dentro de un compartimiento cerrado en un tren de equivalencia

que viaje de manera uniforme por una vía recta (o en un avión que vuele a través de aire en calma con la cortina de la ventana corrida) podría dar ninguna información que indicara si el tren se movía o estaba en reposo (o si el avión estaba en el aire o en reposo sobre la pista). Pero si la vía no fuera lisa y recta (o si el aire fuese turbulento), la situación sería muy diferente: el movimiento uniforme cedería su lugar a un movimiento acelerado, que se apreciaría con facilidad. La convicción de Einstein de que las leyes de la naturaleza deben expresarse en la misma forma en todo marco de referencia, acelerado o no acelerado, fue la principal motivación que lo condujo a la teoría de la relatividad general.

Mucho antes de que hubiera naves espaciales reales, Einstein pudo imaginarse en un vehículo alejado de influencias gravitacionales. En dicha nave espacial en reposo o en movimiento uniforme en relación con las estrellas distantes, él y todo lo que estuviera en el interior de la nave flotaría libremente; no habría "arriba" ni "abajo".

Pero, cuando los motores de la nave se encendieran y la nave acelerara, las cosas serían diferentes: se observarían fenómenos como los causados por la gravedad. La pared ad-F I G U R A 3 6 . 1

yacente a los motores de la nave empujaría contra todos los ocupantes y se convertiría Todo carece de peso en el interior de

en el piso, mientras que la pared opuesta se convertiría en el techo. Los ocupantes de una nave espacial no acelerada lejos de

influencias gravitacionales.

la nave podrían ponerse de pie sobre el piso e incluso saltar. Si la aceleración de la nave fuera igual a g, los ocupantes bien podrían convencerse de que la nave no acelera, sino que está en reposo sobre la superficie de la Tierra.

Para examinar esta nueva "gravedad" en una nave espacial que acelera, considera los resultados de soltar dos bolas dentro de la nave espacial, una hecha de madera y la otra de plomo. Cuando las bolas se sueltan, siguen moviéndose hacia arriba una al lado de la otra con la misma velocidad que la nave tenía al momento en que se soltaron. Si la nave se moviera con una velocidad constante (aceleración cero), las bolas permanece-rían suspendidas en el mismo lugar porque ellas y la nave recorren la misma distancia en cualquier intervalo de tiempo determinado. Pero, debido a que la nave acelera, el piso se mueve hacia arriba más rápido que las bolas, con el resultado de que el piso pronto se topa con las bolas (Figura 36.3). Ambas bolas, sin importar su masa, encuentran el piso al mismo tiempo. Al recordar la demostración de Galileo en la torre inclinada de Pisa, los ocupantes de la nave probablemente atribuirían sus observaciones a la fuerza de gravedad.

F I G U R A 3 6 . 2

Cuando la nave espacial acelera, un ocu-

pante en su interior siente "gravedad."

La relatividad especial es "espe-

cial" en el sentido de que aborda

los marcos de referencia con un

movimiento uniforme: los que no

están acelerados. La relatividad

general es "general" y aborda

también los marcos de referencia

acelerados. La teoría de la relati-

F I G U R A 3 6 . 3

vidad general presenta una nueva

Para un observador dentro de la nave que acelera, una bola de plomo y una bola de madera pare-teoría de la gravedad.

cen caer juntas cuando se les suelta.

Las dos interpretaciones de las bolas que caen son igualmente válidas, y Einstein incorporó esta equivalencia, o imposibilidad de distinguir entre gravitación y aceleración, en el fundamento de su teoría de la relatividad general. El principio de equivalencia afirma

que las observaciones hechas en un marco de referencia acelerado son SCREENCAST: Relatividad general

indistinguibles de las observaciones hechas en un campo gravitacional newtoniano.

Esta equivalencia sería interesante mas no revolucionaria si pudiera aplicarse sólo a fenómenos mecánicos, pero Einstein fue más allá y afirmó que el principio se sostiene para todos los fenómenos naturales; también se sostiene para los fenómenos ópticos y para todos los electromagnéticos.

P U N T O D E C O N T R O L

Si sueltas una bola dentro de una nave espacial en reposo sobre una plataforma de lanzamiento, verás que acelera hacia el piso. Lejos de la Tierra,

¿de qué otro modo podrías ver que la bola hace lo mismo?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

También podrías ver que la bola acelera hacia el piso si tu nave espacial acelera a g.

36.2 Doblamiento de la luz por la gravedad

Una bola lanzada lateralmente en una nave espacial estacionaria en una región sin gravedad seguirá una trayectoria en línea recta con respecto tanto a un observador dentro de la nave como a un observador estacionario fuera de la nave. Pero si la nave acelera, el piso se adelanta a la bola como en el ejemplo anterior. Un observador fuera de la nave todavía ve una trayectoria en línea recta, pero para un observador dentro de la nave que acelera, la trayectoria es curva; es una parábola (Figura 36.4b). Lo mismo sucede con un haz de luz.

F I G U R A 3 6 . 4

(a) Un observador externo ve que una

bola lanzada horizontalmente viaja en

línea recta. Puesto que la nave se mueve

hacia arriba mientras la bola viaja hori-

zontalmente, la bola golpea la pared que

está enfrente de la ventana por debajo de

un punto. (b) Para un observador en el

interior, la bola se dobla como si estuvie-

ra en un campo gravitacional.

(a)

(b)

Imagina que un rayo de luz entra en la nave espacial horizontalmente por una ventana lateral, atraviesa una hoja de vidrio en medio de la cabina, deja un rastro visible y luego llega a la pared de enfrente, todo en un tiempo muy corto. El observador externo ve que el rayo de luz entra por la ventana y se mueve horizontalmente a lo largo de una línea recta con una velocidad constante hacia la pared de enfrente. Pero la nave espacial acelera hacia arriba. Durante el tiempo que la luz tarda en llegar a la hoja de vidrio, la En realidad Einstein se imaginó

nave espacial se mueve hacia arriba determinada distancia, y, durante el tiempo en que que estaba en elevadores, ¡sin

la luz continúa hacia la pared de enfrente, la nave espacial se mueve hacia arriba una duda más comunes en la época

distancia mayor. De este modo, para los observadores en la nave espacial la luz siguió que las naves espaciales!

una trayectoria que se curva hacia abajo (Figura 36.5b). En este marco de referencia

acelerado, el rayo de luz se desvía hacia abajo, hacia el piso, como se desvía la bola lanzada en la Figura 36.4b. La curvatura de la bola de movimiento lento es muy pronunciada, pero si la bola de algún modo se lanzara horizontalmente por la cabina de la nave espacial con una velocidad igual a la de la luz, su curvatura coincidiría con

la curvatura del rayo de luz.

F I G U R A 3 6 . 5

(a) Un observador externo ve que la luz

Punto enfrente

viaja horizontalmente en línea recta, y,

al igual que la bola de la figura anterior,

de la ventana

golpea la pared de enfrente de la ventana

un poco por debajo de un punto.

Desviación

(b) Para un observador interno, la luz se

dobla como si respondiera a un campo

gravitacional.

Hoja

La luz golpea aquí

de vidrio

(a)

(b)

Un observador en el interior de la nave siente "gravedad" debido a la aceleración de la nave. El observador no se sorprende por la desviación de la bola lanzada, pero puede sorprenderse mucho por la desviación de la luz. De acuerdo con el principio de equivalencia, si la luz se desvía por la aceleración, debe desviarse por la gravedad.

Sin embargo, ¿cómo es que la gravedad puede doblar la luz? De acuerdo con la física de Newton, la gravitación es una interacción entre masas; una bola en movimiento se curva debido a la interacción entre su masa y la masa de la Tierra. Pero, ¿qué hay de la F I G U R A 3 6 . 6

luz, que es energía pura y no tiene masa? La respuesta de Einstein fue que la luz puede La trayectoria de un haz de luz prono tener masa, pero no "carece de energía". La gravedad tira sobre la energía de la luz veniente de una linterna es idéntica a

porque la energía es equivalente a la masa.

la trayectoria que tendría una pelota

Ésta fue la primera respuesta de Einstein, antes de desarrollar por completo la teoría de béisbol si pudiera "lanzarse" con la

de la relatividad general. Después, dio una explicación más profunda: que la luz se rapidez de la luz. Ambas trayectorias se

curvan por igual en un campo gravita-

dobla cuando viaja en una geometría espacio-tiempo que se dobla. Después, en este cional uniforme.

capítulo, verás que la presencia de una masa resulta en el doblamiento o deformación del espacio-tiempo. La masa de la Tierra es muy pequeña para deformar de manera considerable el espacio-tiempo circundante, que es prácticamente plano, de modo que cualquier doblamiento de la luz en el ambiente inmediato normalmente no se detecta.

Sin embargo, cerca de los cuerpos con masa mucho mayor que la de la Tierra, el doblamiento de la luz es tan grande que puede detectarse.

Einstein predijo que la luz estelar que pasa cerca del Sol se desviaría en un ángulo de 1.75 segundos de arco —suficientemente grande como para medirlo—. Aunque las estrellas no son visibles cuando el Sol está en el cielo, la desviación de la luz estelar puede observarse durante un eclipse de Sol. (La medición de esta desviación se ha vuelto una práctica habitual en cada eclipse total desde que se realizaron las primeras mediciones durante el eclipse total de 1919.) Una fotografía de un cielo oscurecido alrededor del A

Sol eclipsado revela la presencia de las brillantes estrellas cercanas. Las posiciones de las estrellas se comparan con las de otras fotografías de la misma área tomadas en otros momentos en la noche con el mismo telescopio. En todos los casos, la desviación de la B

luz estelar sustenta la predicción de Einstein (Figura 36.7).

La luz también se dobla en el campo gravitacional de la Tierra, pero no tanto. Uno no lo aprecia porque el efecto es muy pequeño. Por ejemplo, en un campo gravitacio-F I G U R A 3 6 . 7

nal constante de 1 g, un haz de luz dirigida horizontalmente "caerá" una distancia La luz estelar se dobla cuando roza al

vertical de 4.9 m en 1 s (tal como lo haría una pelota de béisbol), pero recorrerá una Sol. El punto A muestra la posición

aparente; el punto B muestra la posición

distancia horizontal de 300,000 km en ese tiempo. Su curva difícilmente se aprecia verdadera.

cuando estás así de lejos del punto de partida. Pero si la luz recorriera 300,000 km en

C A PÍ T U LO 3 6 T EO R Í A D E L A R EL AT I V I DA D GEN ER A L

691

múltiples reflexiones entre espejos paralelos idealizados, el efecto sería bastante notorio (Figura 36.8). (Hacer esto sería un genial proyecto doméstico para créditos adicionales, como ganar créditos para un doctorado.)

F I G U R A 3 6 . 8

Paredes

Espejos perfectamente reflejantes

Láser

(a) Si una bola se lanza horizontalmente

entre un par vertical de paredes parale-

las, rebotará de ida y vuelta y caerá una

distancia vertical de 4.9 m en 1 s.

(b) Si un haz horizontal de luz se dirige

4.9 m

entre un par vertical de espejos ideales

perfectamente paralelos, se reflejará

de ida y vuelta y caerá una distancia

vertical de 4.9 m en 1 s. El número de

reflexiones de ida y vuelta se simplifi-

(a)

(b)

ca sobremanera en el diagrama; si los

espejos estuvieran separados 300 km,

por ejemplo, 1,000 reflexiones ocurri-

rían en 1 s.

P U N T O D E C O N T R O L

1. ¡Hala! Aprendiste que el jalón de la gravedad es una interacción entre masas. Y aprendiste que la luz no tiene masa. Ahora se dice que la luz puede doblarse por la gravedad. ¿No es esto una contradicción?

2. ¿Por qué no percibes el doblamiento de la luz en el entorno

cotidiano?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. No hay contradicción cuando la equivalencia masa-energía se entiende. Es cierto que la luz no tiene masa, pero no "carece de energía". El hecho de que la gravedad desvía la luz demuestra que la gravedad "jala" la energía de la luz. De hecho,

¡la energía es equivalente a la masa!

2. Sólo porque la luz viaja muy rápido; así como, en una distancia corta, no aprecias la trayectoria curvada de una bala con gran rapidez, no percibes la curvatura de un haz de luz.

36.3 Gravedad y tiempo:

corrimiento gravitacional al rojo

Reloj 1

De acuerdo con la teoría de la relatividad general de Einstein, la gravitación hace que el Reloj 2

tiempo corra lento. Si te mueves en la dirección en la que la fuerza gravitacional actúa (de lo alto de un rascacielos al suelo, por ejemplo, o de la superficie de la Tierra al fondo Reloj 3

de un pozo) el tiempo correrá más lento en el punto al que llegas que en el punto de donde partiste. Para entender que los relojes se atrasen por la gravedad puedes aplicar el principio de equivalencia y la dilatación del tiempo a un marco de referencia acelerado. F I G U R A 3 6 . 9

Los relojes 1 y 2 están en un disco

Imagina el marco de referencia acelerado como un gran disco giratorio. Supón que acelerado, y el reloj 3 está en reposo mides el tiempo con tres relojes idénticos: uno colocado en el centro del disco, un en un marco inercial. Los relojes 1 y 3

segundo colocado en la orilla del disco y el tercero en reposo en el suelo cercano (Fi- corren a la misma tasa, mientras que el gura 36.9). De acuerdo con las leyes de la relatividad especial, se sabe que el reloj del reloj 2 corre más lento. Desde el punto centro, dado que no se mueve con respecto al suelo, debe correr a la misma razón

que de vista de un observador en el reloj 3, el el reloj del suelo, mas no a la misma razón que el reloj de la orilla del disco. El reloj de la reloj 2 corre lento debido a su movi-orilla está en movimiento con respecto al suelo y, por tanto, debe observarse que funcio- miento. Desde el punto de vista de un observador en el reloj 1, el reloj 2 corre

na más lento que el reloj del suelo y, en consecuencia, más lento que el reloj del centro lento porque está a un potencial menor del disco. Aunque los relojes en el disco están unidos al mismo marco de referencia, (se necesitaría trabajo para moverlo de la no corren de manera sincronizada; el reloj exterior corre más lento que el reloj interior. orilla al centro).

Un observador sobre el disco giratorio y un observador en reposo en el suelo ven ambos la misma diferencia en las razones de los relojes entre ellos mismos y el reloj de la orilla. Sin embargo, cada uno de los observadores interpreta la diferencia de un modo distinto. Para el observador en el suelo, la razón más lenta del reloj de la orilla se debe a su movimiento. Pero, para el observador en el disco giratorio, los relojes del disco no están en movimiento uno con respecto al otro; más bien, una fuerza centrífuga actúa sobre el reloj de la orilla, mientras que tal fuerza no actúa sobre el reloj del centro. Es probable que el observador en el disco concluya que la fuerza centrífuga tiene algo que ver con que el tiempo corra lento. Él observa que, cuando se mueve en la dirección de la fuerza centrífuga, del centro a la orilla del disco, el tiempo es más lento. Al aplicar el principio de equivalencia, que dice que cualquier efecto de la aceleración puede reproducirse por la gravedad, debes concluir que, cuando te mueves en la dirección en la que actúa la fuerza gravitacional, el tiempo también será más lento.

Esta lentitud se aplicará a todos los "relojes", ya sean físicos, químicos o biológicos.

Una ejecutiva que trabaje en la planta baja de un alto rascacielos envejecerá con más lentitud que su hermana gemela que trabaja en el último piso. La diferencia es muy pequeña, sólo de algunas millonésimas de segundo por década, porque, según estándares

cósmicos, la distancia es pequeña y la gravitación es débil. En el caso de diferencias más grandes en la gravitación, como las que hay entre la superficie del Sol y la superficie de la Tierra, las diferencias en tiempo son mayores (aunque todavía pequeñas).

Un reloj en la superficie del Sol debe correr considerablemente más lento que un reloj en la superficie de la Tierra. Años antes de concluir su teoría de la relatividad general, Einstein sugirió una forma de medir esto cuando formuló el principio de equivalencia en 1907.

F I G U R A 3 6 . 1 0

Si te mueves de un punto distante hacia

la superficie de la Tierra, te mueves en la

dirección en la que actúa la fuerza gravi-

tacional: hacia una ubicación en donde

los relojes corren más lento. Un reloj

en la superficie de la Tierra corre más

lento que un reloj lejos de ella.

Todos los átomos emiten luz a frecuencias específicas características de la tasa vibratoria de los electrones en el interior del átomo. Por lo tanto, todo átomo es un "reloj"

y la vibración atómica más lenta indica el enlentecimiento de tales relojes. Un átomo en el Sol debe emitir luz de una frecuencia más baja (vibración más lenta) que la luz emitida por el mismo elemento en la Tierra. Dado que la luz roja está en el extremo de la frecuencia baja del espectro visible, una reducción de frecuencia corre el color Los astrofísicos no sólo descri-hacia el rojo. Este efecto se llama corrimiento al rojo gravitacional. El corrimiento al ben cómo se ve el cielo, sino que

rojo gravitacional se observa en la luz proveniente del Sol, pero hay varias influencias explican cómo es que llegó a ser

perturbadoras que impiden hacer mediciones exactas de este pequeño efecto. No fue como es.

sino hasta 1960 cuando una técnica completamente nueva, que

utiliza rayos gamma provenientes de átomos radiactivos, permitió realizar mediciones increíblemente precisas que confirmaban el enlentecimiento gravitacional del tiempo entre el último y el primer piso de un edificio de laboratorios de la Harvard University.1

1A finales de la década de 1950, poco después de la muerte de Einstein, el físico alemán Rudolph Mössbauer descubrió un importante efecto en la física nuclear que ofrece un método extremadamente exacto de usar los núcleos atómicos como relojes atómicos. El efecto Mössbauer, por el cual su descubridor ganó el Premio Nobel, tiene muchas aplicaciones prácticas. A finales de 1959, Robert Pound y Glen Rebka, de la Harvard University, concibieron una aplicación que ponía a prueba la relatividad general y realizaron el experimento de confirmación.

C A PÍ T U LO 3 6 T EO R Í A D E L A R EL AT I V I DA D GEN ER A L

693

De modo que las mediciones del tiempo dependen no sólo del movimiento relativo, como aprendiste en el Capítulo 35, sino también de la gravedad. En la relatividad especial, la dilatación del tiempo depende de la rapidez de un marco de referencia en relación con otro. En la relatividad general, el corrimiento al rojo gravitacional El Sistema de Posicionamien-depende de la ubicación de un punto en un campo gravitacional en relación con otro.

to Global (GPS) debe tener en

cuenta el efecto de la gravedad,

Visto desde la Tierra, un reloj se juzgará que hace tictac con más lentitud sobre la así como la rapidez de los relojes

superficie de una estrella que sobre la Tierra. Si la estrella se encoge,

su superficie se atómicos en órbita. Debido a

mueve hacia adentro, hacia una gravedad cada vez más intensa, lo cual hace que el la gravedad, los relojes operan

tiempo en su superficie se haga cada vez más lento. Deberían medirse intervalos más más rápido en órbita. Debido

largos entre los tictac del reloj estelar. Pero si las mediciones del reloj estelar las haces a la rapidez, corren más lento.

Los efectos varían durante cada

desde la misma estrella, no observarás nada raro en el funcionamiento del reloj.

órbita elíptica y no se cancelan.

Supón, por ejemplo, que un voluntario indestructible está de pie sobre la super-Cuando tu unidad de GPS te

ficie de una estrella gigante que comienza a colapsar. Tú, como observador externo, indica exactamente dónde estás,

observarás un progresivo enlentecimiento del tiempo en el reloj del voluntario a me-agradéceselo a Einstein.

dida que la superficie de la estrella retroceda a regiones de gravedad más intensa. Sin embargo, el voluntario no percibe diferencia alguna en su propio tiempo. Ve los eventos dentro de su propio marco de referencia y no percibe nada extraño. A medida que la estrella que colapsa se encoge con tendencia a convertirse en un agujero negro y el tiempo avanza normalmente desde el punto de vista del voluntario, tú en el exterior percibes que el tiempo del voluntario se aproxima a un alto total; lo ves congelarse en el tiempo con un intervalo de tiempo infinito entre los tictac de su reloj o los latidos de su corazón. Desde tu punto de vista, su tiempo se detiene por completo. El corrimiento al rojo gravitacional, en lugar de ser un efecto pequeño, es dominante.

Puedes entender el corrimiento al rojo gravitacional desde otro punto de vista: en términos de la fuerza gravitacional que actúa sobre los fotones. Conforme un fotón vuela de la superficie de una estrella, se "retarda" por la gravedad de la estrella. Pierde energía (mas no rapidez). Dado que la frecuencia de un fotón es proporcional a su energía, su frecuencia disminuye a medida que su energía disminuye.

Cuando observas el fotón, ves que tiene una frecuencia menor de la que tendría si se hubiera emitido por una fuente menos masiva. Su tiempo se enlenteció, como el tictac de un reloj se hace más lento. En el caso de un agujero negro, un fotón es incapaz de escapar en absoluto.

Pierde toda su energía y toda su frecuencia en el intento. Su frecuencia corre al rojo gravitacional hasta ser cero, lo que es congruente con tu observación de que la tasa a la que el tiempo pasa en una estrella que colapsa tiende a cero.

Es importante señalar la naturaleza relativista del tiempo tanto en la relatividad especial como en la relatividad general. En ambas teorías, no hay forma de extender la duración de tu propia existencia. Otros que se muevan con diferentes rapideces o en distintos campos gravitacionales podrían atribuirte una gran longevidad, pero tu longevidad es vista desde sus marcos de referencia, nunca desde el tuyo. Los cambios en el tiempo siempre se atribuyen al otro.

P U N T O D E C O N T R O L

¿Una persona en lo alto de un rascacielos envejecerá más rápido o más lento que una persona en la planta baja?

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

Más rápido. Ir de lo alto del rascacielos a la planta baja es ir en la dirección de la fuerza gravitacional, de modo que es ir hacia un lugar donde el tiempo corre más lento.

36.4 Gravedad y espacio:

el movimiento de Mercurio

A partir de la teoría de la relatividad especial se sabe que las mediciones de espacio y tiempo experimentan transformaciones cuando se involucra el movimiento. Lo mismo sucede con la teoría general: las mediciones del espacio difieren en campos gravitacionales distintos, por ejemplo, cerca y lejos del Sol.

Los planetas orbitan el Sol y las estrellas en órbitas elípticas y se mueven de manera periódica hacia regiones más alejadas del Sol y más cercanas al Sol. Einstein dirigió F I G U R A 3 6 . 1 1

su atención hacia los campos gravitacionales variables que experimentan los planetas Una órbita elíptica en precesión.

que orbitan el Sol y descubrió que las órbitas elípticas de los planetas deben tener una precesión (Figura 36.11), independientemente de la influencia newtoniana de otros planetas. Cerca del Sol, donde el efecto de la gravedad sobre el tiempo es el más grande, la tasa de precesión debe ser la más alta; lejos del Sol, donde el tiempo es menos afectado, cualquier desviación de la mecánica newtoniana debe ser prácticamente imperceptible.

Mercurio, el planeta más cercano al Sol, está en la parte más intensa del campo gravitacional del Sol. Si la órbita de algún planeta muestra una precesión mensurable, debe ser Mercurio, y el hecho de que la órbita de Mercurio sí tenga precesión, por encima de los efectos atribuibles a los demás planetas, ha sido un misterio para los astrónomos desde comienzos del siglo XIX. Mediciones cuidadosas demostraron que la órbita de Mercurio tiene una precesión de aproximadamente 574 segundos de arco por siglo. Se descubrió que las perturbaciones de los demás planetas explicaban todo, menos 43 segundos de arco por siglo. Incluso después de aplicar todas las correcciones conocidas debidas a posibles perturbaciones por otros planetas, los cálculos de físicos y astrónomos no lograban explicar los 43 segundos de arco adicionales. O bien, Venus era extramasivo o un planeta nunca descubierto (llamado Vulcano) jalaba sobre Mercurio. Y entonces llegó la explicación de Einstein, ¡cuyas ecuaciones de campo de la relatividad general aplicadas a la órbita de Mercurio predicen 43 segundos de arco adicionales por siglo!

El misterio de la órbita de Mercurio se solucionó, y se reconoció una nueva teoría Una hipótesis incorrecta, tratada

rigurosamente, en ocasiones

de la gravedad. La ley de gravitación de Newton, que se había mantenido en pie como puede producir más información

un pilar inamovible de la ciencia durante más de dos siglos, resultó ser un caso espe-nueva y útil que una observación

cial en el límite de la teoría más general de Einstein. Si los campos gravitacionales son sin guía.

comparativamente débiles, la ley de Newton resulta ser una buena aproximación de la nueva ley, tanto así que la ley de Newton, con la que es más fácil de trabajar matemáticamente, es la ley que los científicos espaciales de hoy usan la mayor parte del tiempo.

36.5 Gravedad, espacio y una nueva geometría

C

Puedes comenzar a entender que las mediciones del espacio se alteran en un campo D

gravitacional si piensas de nuevo en el marco de referencia acelerado del disco giratorio. Supón que mides la circunferencia del borde exterior con un metro. Recuerda la contracción de Lorentz de la relatividad especial: el metro parecerá contraído para cualquier observador que no se mueva junto con él, mientras que las dimensiones de F I G U R A 3 6 . 1 2

un metro idéntico que se mueva mucho más lento cerca del centro casi no serán afec-Un metro a lo largo de la orilla del

tadas (Figura 36.12). Todas las mediciones de distancia a lo largo de un radio del disco disco giratorio se ve contraído, mientras

giratorio no deben afectarse en absoluto por el movimiento, porque el movimiento que un metro más alejado y con un

es perpendicular al radio. Debido a que sólo las mediciones de distancia paralelas a movimiento más lento no se contrae

y alrededor de la circunferencia son afectadas, la razón de la circunferencia con res-tanto. Un metro a lo largo del radio no

pecto al diámetro cuando el disco gira ya no es la constante fija (3.14159. .) sino una se contrae en absoluto. Cuando el disco

variable que depende de la rapidez angular y el diámetro del disco.

no gira, C/D 5 , pero cuando el disco

De acuerdo con el principio de equivalencia, el disco giratorio es equivalente a un gira, C/D no es igual a y la geometría

euclidiana ya no es válida. Lo mismo

disco estacionario que tiene un campo gravitacional intenso cerca de

su borde y ocurre en un campo gravitacional.

un campo gravitacional progresivamente más débil hacia su centro. Las mediciones de

C A PÍ T U LO 3 6 T EO R Í A D E L A R EL AT I V I DA D GEN ER A L

695

distancia, entonces, dependerán de la intensidad del campo gravitacional (o, más exactamente, para entusiastas de la relatividad, del potencial gravitacional), aun cuando no haya ningún movimiento relativo. La gravedad hace que el espacio sea no-euclidiano; las leyes de la geometría euclidiana que se enseñan en bachillerato ya no son válidas El modelo de cosmología (la

cuando se aplican a objetos en presencia de campos gravitacionales intensos.

ciencia del universo) aceptado en

la actualidad supone un universo

Las conocidas reglas de la geometría euclidiana son apropiadas para varias figuras plano dominado por materia

que puedes dibujar sobre una superficie plana. La razón de la circunferencia de un oscura y energía oscura que se

círculo con respecto a su diámetro es igual a , todos los ángulos en un triángulo formaron por el rápido hincha-suman 180 y la distancia más corta entre dos puntos es una línea recta. Las reglas de miento desde sus densos orígenes

la geometría euclidiana son válidas en el espacio plano, pero si dibujas estas figuras calientes.

sobre una superficie curva, como una esfera o un objeto con forma de silla de montar, las reglas euclidianas ya no funcionan (Figura 36.13). Si mides la suma de los ángulos de un triángulo en el espacio, llamas al espacio "plano" si la suma es igual a 180, esférico o positivamente curvo si la suma es mayor que 180, y con forma de silla de montar o negativamente curvo si la suma es menor que 180.

F I G U R A 3 6 . 1 3

La suma de los ángulos de un triángulo

depende del tipo de superficie sobre la

cual se dibuje el triángulo. (a) En una

superficie plana, la suma es 180.

(b) En una superficie esférica, la suma

es mayor que 180. (c) En una superficie

(a)

(b)

(c)

con forma de silla de montar, la suma es

menor que 180.

Desde luego, las líneas que forman los triángulos de la Figura 36.13 no son todas

"rectas" desde una visión tridimensional, pero son las distancias "más rectas", o más cortas, entre dos puntos si estás confinado a la superficie curva. Estas líneas de distan-La geometría del Universo puede

cia más corta se llaman líneas geodésicas, o simplemente geodésicas.

indicar su destino final. Un Univer-

La trayectoria de un haz de luz sigue una geodésica. Imagina que tres experimentado-so esférico tiene suficiente masa-

res en la Tierra, Venus y Marte, miden los ángulos de un triángulo formado por los haces energía como para, a la larga,

de luz que viajan entre estos tres planetas cuando no están todos del mismo lado del Sol dejar de expandirse y contraerse:

(Figura 36.14). Los haces de luz se doblan cuando pasan al lado del Sol, lo que resulta en un "Big Crunch", lo opuesto del

que la suma de los tres ángulos sea mayor que 180

“Big Bang”. Un Universo con for-

. De modo que el espacio alrededor del

ma de silla de montar tiene muy

Sol es positivamente curvo. Los planetas que orbitan al Sol viajan a lo largo de geodésicas poca masa-energía para alguna

tetradimensionales en este espacio-tiempo con curva positiva. Los objetos, satélites y ra-vez frenar su expansión hasta

yos de luz que caen libremente viajan todos a lo largo de geodésicas en el espacio-tiempo detenerse. Un Universo plano

tetradimensional.

tiene muy poca masa-energía para

“Pequeñas” partes del Universo ciertamente son curvas. ¿Y qué hay del Universo en alguna vez dejar de expandirse.

su totalidad? Estudios recientes de la radiación de temperatura baja en el espacio, que es un remanente del Big Bang, sugiere que el Universo a gran escala es plano. Si tuviera un extremo abierto como la sil a de montar de la Figura 36.13c, se extendería por siempre y los haces de luz que parten paralelos divergirían. Si estuviera cerrado como la superficie esférica de la Figura 36.13b, los haces de luz que partieran paralelos con el tiempo se cru-zarían y harían círculos de vuelta a su punto de partida. En tal Universo, si pudieras mirar infinitamente en el espacio con un telescopio ideal, ¡verías la parte de atrás de tu cabeza (después de esperar pacientemente durante algunos miles de mil ones de años)! En el actual Universo plano, los haces paralelos de luz siguen siendo paralelos y nunca regresarán. FIGUR A 36.14

La relatividad general exige una nueva geometría: en lugar de que el espacio sólo sea Los rayos de luz que unen a los tres una región de la nada, el espacio es un medio flexible que puede doblarse y torcerse. planetas forman un triángulo. Dado La forma en que se dobla y se tuerce la describe un campo gravitacional. La relatividad que la luz que pasa cerca del Sol se general es una geometría de un espacio-tiempo curvo tetradimensional.2 La matemática dobla, la suma de los ángulos del trián-de esta geometría es imponente y no podría presentarse aquí. Sin embargo, la esencia es gulo resultante es mayor que 180.

2No te desanimes si no puedes imaginar el espacio-tiempo tetradimensional. El mismo Einstein solía decir a sus amigos: "No lo intenten. Yo tampoco puedo hacerlo". ¡Quizás no seas muy diferente de los grandes pensado -

res de la época de Galileo que no podían imaginar que la Tierra se moviera!

696

PA R T E O C H O

R EL AT I V I DA D

que la presencia de masa produce la curvatura, o deformación, del espacio-tiempo. Por el contrario, una curvatura del espacio-tiempo muestra que una masa debe estar presente.

En lugar de imaginar las fuerzas gravitacionales entre las masas, abandona por completo la noción de fuerza y en su lugar piensa en las masas que responden en su movimiento a la deformación del espacio-tiempo donde habitan. Las protuberancias, depresiones y defor-maciones del espacio-tiempo geométrico son los fenómenos de la gravedad.

D

F I G U R A 3 6 . 1 5

La geometría de la superficie curva de la Tierra difiere de la geometría euclidiana del espacio plano.

90°

Observa, en el globo a la izquierda, que la suma de los ángulos de un triángulo equilátero, en el que 90°

C = 2D

cada lado es igual a ¼ la circunferencia de la Tierra, evidentemente es mayor que 180

90°

. El globo de

la derecha muestra que la circunferencia de la Tierra sólo es el doble

de su diámetro y no 3.14 veces su diámetro. La geometría euclidiana tampoco es válida en el espacio curvo.

No puedes visualizar las protuberancias y depresiones tetradimensionales en el espacio-tiempo porque eres un ser tridimensional. Puedes vislumbrar esta deformación si piensas en una analogía simplificada en dos dimensiones: una bola pesada descansa en medio de una cama de agua. Mientras más masiva sea la bola, mayor es la abolladura o deformación de la superficie bidimensional. Una canica que ruede por la cama, F I G U R A 3 6 . 1 6

pero lejos de la bola, rodará en una trayectoria relativamente recta, mientras que una Una analogía bidimensional del espacio-canica que ruede cerca de la bola se curvará cuando ruede por la superficie abollada.

tiempo tetradimensional deformado. El

Si la curva se cierra sobre sí misma, su forma se asemeja a una elipse. Los planetas espacio-tiempo cerca de una estrella se

que orbitan el Sol igualmente viajan a lo largo de geodésicas tetradimensionales en el curva en una forma similar a la super-espacio-tiempo deformado en torno al Sol.

ficie de una cama de agua cuando una

bola pesada descansa sobre ella.

36.6 Ondas gravitacionales

Todo objeto tiene masa y, por tanto, deforma el espacio-tiempo circundante. Cuando un objeto experimenta un cambio en su movimiento —una aceleración— la deformación Una de las predicciones de la

circundante se mueve con la finalidad de reajustarse a la nueva posición. Estos reajustes relatividad general es una torsión

producen ondas en la geometría global del espacio-tiempo. Esto es similar a mover una sutil del espacio-tiempo alrededor

bola que descansa sobre la superficie de una cama de agua. Una perturbación viaja por de un objeto giratorio masivo. Una

la superficie de la cama de agua en forma de ondas; si mueves una bola más masiva, en-prueba de este efecto de "arrastre

de marco" serían los pequeños

tonces obtienes una mayor perturbación y se producen ondas incluso más intensas. Lo cambios predecibles en las orien-mismo ocurre con el espacio-tiempo en el Universo. Ondas similares viajan hacia afuera taciones de las órbitas de los satéli-desde una fuente gravitacional con la rapidez de la luz y son ondas gravitacionales.

tes y giroscopios en órbita. Los

Cualquier objeto acelerado produce una onda gravitacional. En general, cuanto investigadores en 2004 descubrie-más masivo sea el objeto y mayor su aceleración, más intensa es la onda gravitacional ron esta evidencia confirmadora.

resultante. Pero incluso las ondas más intensas producidas por eventos astronómicos habituales son en extremo débiles, las más débiles conocidas en la naturaleza. Por ejemplo, las ondas gravitacionales emitidas por una carga eléctrica en vibración son un trillón de trillones de veces más débiles que las ondas electromagnéticas emitidas por la misma carga. Detectar ondas gravitacionales es muy difícil, y no hubo ninguna detección confirmada sino hasta 2014, cuando un equipo de investigadores encabeza-dos por el astrofísico John Kovak, del Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics El espacio se estira y lleva consigo

observó un patrón de polarización en la radiación de fondo cósmico probablemente a las galaxias. La luz visible del

Universo temprano se ha estirado

causado por ondas gravitacionales en el mismísimo comienzo del Universo, lo que para ahora ser radiación de

brinda sustento a la hipótesis inicial del Universo que se infla y el Big Bang. ¡Un des-microondas con una longitud de

cubrimiento fascinante!

onda relativamente larga.

Por débiles que sean, las ondas gravitacionales están en todas partes.

Sacude la mano: acabas de producir una onda gravitacional. No es muy intensa, pero existe.

C A PÍ T U LO 3 6 R E V ISI Ó N

697

36.7 Gravitación newtoniana y einsteiniana

Cuando Einstein formuló su nueva teoría de la gravitación, se dio cuenta de que, si su teoría era válida, sus ecuaciones de campo debían reducirse a las ecuaciones newtonianas de la gravitación en el límite de un campo débil. Demostró que la ley de gravitación de Newton es un caso especial de la teoría más amplia de la relatividad. La ley de gravitación de Newton sigue siendo una descripción exacta de la mayor parte de las interacciones entre los cuerpos del sistema solar y más allá. Gracias a la ley de Newton uno puede calcular las órbitas de cometas y asteroides e incluso predecir la existencia de planetas no descubiertos. Incluso hoy, cuando se calculan las trayectorias de las sondas espaciales hacia la Luna y otros planetas, sólo se usa la teoría newtoniana común. Esto se debe a que el campo gravitacional de estos cuerpos es muy débil y, desde el punto de vista de la relatividad general, el espacio-tiempo circundante en esencia es plano. Pero para regiones de gravitación más intensa, donde el espacio-tiempo es mu-En 2005 los investigadores con-

cho más curvo, la teoría newtoniana no puede explicar de manera adecuada los diver-firmaron las predicciones de las

sos fenómenos, como la precesión de la órbita de Mercurio cerca del Sol y, en el caso de pérdidas de energía debidas a las

campos más intensos, el corrimiento al rojo gravitacional y otras distorsiones aparentes ondas gravitacionales emitidas

en las mediciones del espacio y del tiempo. Estas distorsiones llegan a su límite en el por el sistema de doble pulsar PSR

caso de una estrella que colapsa en un agujero negro, donde el espacio-tiempo se dobla J0737-3039A/B durante un periodo

de tres años. ¡Hurra, Einstein!

por completo sobre sí mismo. Sólo la gravitación einsteiniana alcanza este dominio.

En el Capítulo 32 se vio que la física newtoniana se une en un extremo con la teoría cuántica, cuyo dominio es lo muy ligero y muy pequeño: partículas diminutas y átomos. Y ahora has visto que la física newtoniana se une en el otro extremo con la teoría de la relatividad, cuyo dominio es lo muy masivo y muy grande. Tú no ves el mundo como lo vieron los antiguos egipcios, griegos o chinos. Es poco probable que las personas en el futuro vean el Universo como lo ves tú ahora. La visión actual del Universo puede ser muy limitada, y quizás llena de conceptos erróneos, pero seguramente es más clara que la visión de quienes te antecedieron. La visión actual surge de los hallazgos de Copérnico, Galileo, Newton y, en fecha más reciente, Einstein, hallazgos que muy a menudo fueron rebatidos sobre la base de que minimizaban la importancia de los seres humanos en el Universo. En el pasado, ser importante significaba haberse criado por encima de la naturaleza: apartarse de la naturaleza. Desde entonces, para ampliar esta idea se ha necesitado un enorme esfuerzo, una observación esmerada y un incansable Si el primer curso de física de un

deseo por comprender el entorno. Si se ve desde la manera como se comprende en la alumno es divertido, el rigor de

actualidad el Universo, se descubre la importancia de formar parte de la naturaleza, un segundo curso será bien recibi-no de estar separado de ella. Tú eres parte de la naturaleza que, cada vez más, se está do y significativo.

volviendo consciente de sí misma.

R E S U M E N D E T É R M I N O S (C O N O C I M I E N T O)

Teoría de la relatividad general. La segunda de las teorías

Corrimiento al rojo gravitacional. El alargamiento de las

de relatividad de Einstein, que relaciona la gravedad con

ondas de radiación electromagnética que escapan de un

las propiedades del espacio y el tiempo.

objeto masivo.

Principio de equivalencia. Puesto que las observaciones

Geodésica. La trayectoria más corta entre dos puntos en varios

hechas en un marco de referencia acelerado son indistingui-modelos del espacio.

bles de las observaciones hechas en un campo gravitacional,

Onda gravitacional. Perturbación gravitacional, genera-

cualquier efecto producido por la gravedad puede duplicarse

da por una masa con aceleración, que se propaga por el

si se acelera el marco de referencia.

espacio-tiempo.

698

PA R T E O C H O

R EL AT I V I DA D

P R E G U N T A S C O N C E P T U A L E S (C O M P R E N S I Ó N) 36.1 Principio de equivalencia

11. ¿Para qué tipo de campo gravitacional es válida la ley de

1. ¿Cuál es la principal diferencia entre la teoría de la relati-

Newton?

vidad especial y la teoría de la relatividad general?

36.5 Gravedad, espacio y una nueva geometría

2. En una nave espacial que acelera a g, lejos de la gravedad de la Tierra, ¿cómo se compara el movimiento de una

12. Un metro colocado a lo largo de la circunferencia de un

bola que se suelta, con el movimiento de una bola que se

disco giratorio parecerá contraído, pero si se orienta a lo

suelta en la superficie de la Tierra?

largo de un radio, no lo parecerá. Explica.

3. ¿Exactamente qué es equivalente en el principio de

13. La razón de la circunferencia con respecto al diámetro para

equivalencia?

círculos medidos sobre un disco es igual a cuando el

disco está en reposo, pero no cuando el disco gira. Explica.

36.2 Doblamiento de la luz por la gravedad

14. ¿Qué efecto tiene la masa sobre el espacio-tiempo?

4. Compara el doblamiento de las trayectorias de pelotas de

36.6 Ondas gravitacionales

béisbol y fotones por un campo gravitacional.

5. ¿Por qué el Sol debe eclipsarse para medir la desviación

15. ¿Qué ocurre en el espacio circundante cuando un objeto

de la luz estelar que pasa cerca del Sol?

masivo experimenta un cambio en su movimiento?

16. Una estrella a 10 años-luz de distancia explota y produce

36.3 Gravedad y tiempo: corrimiento

ondas gravitacionales. ¿Cuánto tardarán dichas ondas en

gravitacional al rojo

llegar a la Tierra?

6. ¿Cuál es el efecto de una gravitación intensa sobre las

17. ¿Por qué las ondas gravitacionales son tan difíciles de

mediciones del tiempo?

detectar?

7. ¿Cuál corre más lento: un reloj en lo alto del rascacie-

los más alto de Chicago, o un reloj en la playa del lago

36.7 Gravitación newtoniana y einsteiniana

Michigan?

18. ¿La teoría de gravitación de Einstein invalida la teoría de

8. ¿Cómo se compara la frecuencia de una línea espectral

gravitación de Newton? Explica.

particular observada en luz solar, con la frecuencia de

19. ¿La física newtoniana es adecuada para llevar un cohete a

dicha línea observada desde una fuente en la Tierra?

la Luna?

9. Si ves los eventos que ocurren en una estrella que colapsa

20. ¿Cómo se vincula la física newtoniana con la teoría cuán-

para convertirse en agujero negro, ¿ves que el tiempo se

tica y con la teoría de la relatividad?

acelera o se hace lento?

36.4 Gravedad y espacio: el movimiento de Mercurio

10. De todos los planetas, ¿por qué Mercurio es el mejor

candidato para encontrar evidencia de la relación entre la

gravitación y el espacio?

P I E N S A Y E X P L I C A (S Í N T E S I S)

21. ¿Qué es diferente acerca de los marcos de referencia

26. Tú percibes con facilidad el doblamiento de la luz por

que se aplican a la relatividad especial y a la relatividad

reflexión y refracción, pero, ¿por qué no te percatas del

general?

doblamiento de la luz por la gravedad?

22. Una astronauta despierta en su cápsula cerrada, que en

27. La luz sí se dobla en un campo gravitacional. ¿Por qué

realidad se asienta en la Luna. ¿Ella puede decir si su

este doblamiento no lo tienen en cuenta los topógrafos

peso es el resultado de la gravitación o del movimiento

que usan haces de luz láser como líneas rectas?

acelerado? Explica.

28. ¿Por qué se dice que la luz viaja en líneas rectas? ¿Es estric-

23. Ofrece una explicación clásica para el caso de un astro-

tamente exacto decir que un haz de láser proporciona una

nauta en una nave espacial en órbita que no experimenta

línea perfectamente recta para fines de topografía? Explica.

ninguna fuerza neta (medida por una báscula), aun cuan-

29. Tu amigo dice que la luz que pasa al lado del Sol se dobla

do el astronauta esté en manos de la gravedad terrestre.

ya sea que la Tierra experimente un eclipse solar o no.

24. En una nave espacial lejos del alcance de la gravedad,

¿Estás de acuerdo o en desacuerdo, y por qué?

¿bajo qué condiciones podrías sentir como si la nave estu-

30. En 2004, cuando Mercurio pasó entre el Sol y la Tierra,

viera estacionaria sobre la superficie de la Tierra?

la luz solar no se dobló de manera considerable mientras

25. ¿Qué ocurre con la distancia de separación entre dos

pasaba al lado de Mercurio. ¿Por qué?

personas si ambas caminan hacia el norte con la misma

31. Una puesta de Sol se ve distorsionada en la Tierra, pero

razón desde dos ubicaciones en el ecuador de la Tierra? Y,

no para los astronautas en la Luna. ¿Qué causa esta dis-

sólo por diversión, ¿en qué lugar del mundo un paso en

torsión? (¿Por qué esta pregunta pudo haberse plan teado

cualquier dirección es un paso hacia el sur?

en el Capítulo 28?)

C A PÍ T U LO 3 6 R E V ISI Ó N

699

32. Al final de 1 s, una bala disparada en sentido horizon-

44. ¿Cómo puedes "observar" un agujero negro si ni la mate-

tal en un campo gravitacional de 1 g, cae una distancia

ria ni la radiación pueden escapar de él?

vertical de 4.9 m desde su trayectoria que sería recta sin

45. ¿Debería ser posible en principio que un fotón diera vuel-

el campo. ¿Qué distancia caería un haz de luz desde su

tas a una estrella muy masiva?

trayectoria en línea recta si viajara en un campo uniforme

46. ¿Por qué la atracción gravitacional entre el Sol y Mercurio

de 1 g durante 1 s? ¿Durante 2 s?

varía? ¿Variaría si la órbita de Mercurio fuera perfecta-

33. La luz cambia su energía cuando "cae" en un campo

mente circular?

gravitacional. Sin embargo, este cambio de energía no se

47. Tu amigo dice en un tono enigmático que, en el polo sur,

demuestra con un cambio de rapidez. ¿Cómo se demues-

un paso en cualquier dirección es un paso al norte. ¿Estás

tra este cambio de energía?

de acuerdo?

34. ¿Apreciarías un enlentecimiento o una aceleración de un

48. En el triángulo astronómico que se muestra en la Figu-

reloj si lo llevaras contigo al fondo de un pozo profundo?

ra 36.14, con lados definidos por trayectorias de luz, la

35. Si atestiguas eventos que ocurren en la Luna, donde la

suma de los ángulos internos es mayor que 180. ¿Existe

gravitación es más débil que en la Tierra, ¿esperarías ver

algún triángulo astronómico cuyos ángulos interiores

un corrimiento al rojo gravitacional o un corrimiento al

sumen menos que 180?

azul gravitacional? Explica.

49. ¿Las estrellas binarias (sistemas de doble estrella que orbi-

36. ¿Por qué la intensidad del campo gravitacional aumentará

tan en torno a un centro de masa común) radian ondas

en la superficie de una estrella que se encoge?

gravitacionales? ¿Por qué sí o por qué no?

37. Si la Tierra fuese una esfera perfecta, ¿un reloj en el ecua-

50. Dadas las posibles fuentes de ondas gravitacionales en

dor correría un poco más rápido o un poco más lento que

el Universo, ¿esperarías que éstas tuvieran longitudes de

un reloj idéntico en uno de los polos de la Tierra?

onda cortas o largas?

38. ¿Envejeces más rápido en lo alto de una montaña o en la

51. Con base en lo que sabes acerca de la emisión y la absor-

base de la montaña?

ción de ondas electromagnéticas, sugiere cómo es que se

39. Sutilezas: una persona a la que le preocupa envejecer más

emiten las ondas gravitacionales y cómo es que se absor-

que a un "hombre común y corriente", ¿deberá vivir en

ben. (Los científicos que buscan detectar ondas gravita-

la parte superior o en la planta baja de un edificio alto de

cionales deben hacer montajes para absorberlas.)

departamentos?

52. Al comparar las teorías de gravitación de Einstein y

40. ¿Cuál correría más lento: un reloj en el centro de un

de Newton, ¿cómo puede aplicarse el principio de

hábitat espacial giratorio o uno en la orilla? ¿O no habría

correspondencia?

diferencia?

53. Hallazgos actuales sugieren que el Universo es plano.

41. Sutilezas: si alumbras con un haz de luz colorida a un

¿Cuál es una consecuencia de este hallazgo?

amigo encima de una torre alta, ¿el color de la luz que

54. Elabora una pregunta de opción múltiple que demuestre

recibe tu amigo será del mismo color de la que envías?

que un compañero de clase comprende el principio de

Explica.

equivalencia.

42. ¿La luz emitida desde la superficie de una estrella se corre

55. Elabora una pregunta de opción múltiple que demuestre

al rojo o al azul por la gravedad?

que un compañero de clase comprende el efecto de la

43. ¿Un astronauta que cae hacia un agujero negro vería el

gravedad sobre el tiempo.

Universo exterior correr al rojo o al azul?

P I E N S A Y D I S C U T E (E V A L U A C I Ó N)

56. A un astronauta se le proporciona "gravedad" cuando los

términos del principio de equivalencia. ¿A qué es equiva-

motores de la nave espacial se activan para acelerar la nave.

lente tu vagón que acelera?)

Esto exige el uso de combustible. ¿Hay una manera de

59. Prudencia y Caridad son gemelas criadas en el centro

acelerar y proporcionar "gravedad" sin el uso sostenido de

de un reino giratorio. Caridad se va a vivir a la orilla

combustible? Discute, tal vez con las ideas del Capítulo 8.

del reino durante un tiempo y luego regresa a casa. Dis-

57. En su famosa novela Viaje a la Luna, Julio Verne afirma-

cute cuál gemela es más vieja cuando se vuelven a ver.

ba que los ocupantes de la nave espacial cambiarían su

(Ignora cualquier efecto de dilatación de tiempo asociado

orientación de arriba hacia abajo cuando la nave cruzara

al viaje hacia y desde la orilla.)

el punto donde la gravitación de la Luna fuera mayor que

60. Desde tu marco de referencia sobre la Tierra, los objetos

la de la Tierra. ¿Esto es correcto? Discute.

frenan hasta detenerse conforme se aproximan a un agu-

58. Armado con equipo de detección muy sensible, estás al

jero negro en el espacio, porque el tiempo se vuelve infi-

frente de un vagón de ferrocarril que acelera hacia adelan-

nitamente largo por la intensa gravedad cerca del agujero

te. Tu amigo en la parte posterior del vagón hace brillar

negro. Si cayeran astronautas de manera accidental en

luz verde hacia ti. ¿Descubres que la luz corre al rojo

un agujero negro e intentaran enviar señales a la Tierra

(baja en frecuencia), corre al azul (aumenta en frecuen-

mediante destellos de una luz, ¿qué tipo de "telescopio"

cia) o ninguna de las dos? Explica. (Sugerencia: piensa en

necesitarías para detectar las señales?

P A R T E O C H O

R EL AT I V I DA D

P A R T E O C H O Examen de práctica de opción múltiple

Elige la MEJOR respuesta a cada una de las siguientes:

10. Comparada con la cantidad de movimiento newtoniana p 5 mv, la cantidad de movimiento de un objeto que viaja con gran rapidez es

1. Lo que Einstein descubrió acerca del espacio y el tiempo es que

(a) mayor.

(a) son entidades separadas.

(b) menor.

(b) son partes de un todo.

(c) la misma.

(c) siguen una ley de inverso al cuadrado.

(d) depende de la masa en reposo.

(d) son especiales para los viajeros espaciales.

11. Las ecuaciones de relatividad para el tiempo, la longitud y la

2. En su teoría de la relatividad especial, Einstein afirma que las

cantidad de movimiento son válidas para

leyes de la física son

(a) rapideces cotidianas bajas.

(a) diferentes en distintas situaciones.

(b) rapideces relativistas.

(b) sentido común aplicado a cosas microscópicas y macroscópicas.

(c) Los dos anteriores.

(c) las mismas en todos los marcos de referencia.

(d) Ninguno de los anteriores.

(d) las mismas en todos los marcos de referencia con movi-

12. Decir que E 5 mc 2 es decir que la energía

miento uniforme.

(a) aumenta como la rapidez de la luz al cuadrado.

3. El segundo postulado de Einstein indica que la rapidez de la luz

(b) es el doble de la rapidez de la luz.

(a) depende del marco de referencia.

(c) y la masa son equivalentes.

(b) es una constante en todos los marcos de referencia.

(d) es igual a la masa que viaja a la rapidez de la luz al cuadrado.

(c) proporciona relojes exactos.

13. De acuerdo con el principio de correspondencia,

(d) se enlentece en un medio transparente.

(a) una nueva teoría debe concordar con la teoría anterior

4. Cuando se habla de la dilatación del tiempo, se entiende

donde éstas se traslapen.

que el tiempo

(b) la mecánica de Newton es tan válida como la mecánica de

(a) se comprime con la rapidez.

Einstein.

(b) se estira con la rapidez.

(c) las ecuaciones de relatividad se aplican a grandes rapideces

(c) es una constante a todas las rapideces.

mientras que las ecuaciones de Newton se aplican a rapi-

(d) se relaciona con el espacio.

deces bajas.

5. Si viajas con gran rapidez, entonces, comparado con tus amigos

(d) la relatividad especial y la relatividad general son dos lados

que "permanecen en casa", eres

de la misma moneda.

(a) más viejo.

14. Cosas que son equivalentes de acuerdo con el principio de equi-

(b) más joven.

valencia son

(c) ni más joven ni más viejo.

(a) el espacio y el tiempo.

(d) más alto.

(b) un gemelo viajero y un gemelo que permanece en casa.

6. Los relojes en una nave espacial de movimiento rápido que

(c) la gravedad y la aceleración.

pasa zumbando junto a la Tierra parecen correr lento cuando

(d) la masa y la energía.

se ven desde

15. De acuerdo con la relatividad general,

(a) el interior de la nave.

(a) la masa distorsiona el espacio-tiempo.

(b) la Tierra.

(b) la gravedad afecta los relojes.

(c) Los dos anteriores.

(c) la luz no puede escapar de un agujero negro.

(d) Ninguno de los anteriores.

(d) Todos los anteriores.

7. Si fueras a viajar con una rapidez cercana a la rapidez de la luz,
16. De acuerdo con la geometría tetradimensional, los ángulos de

podrías observar que tu propia(o)

un triángulo suman 180

(a) masa cambia.

(a) siempre.

(c) nunca.

(b) pulso disminuye.

(b) a veces.

(d) sólo en el planeta Tierra.

(c) Los dos anteriores.

17. La relatividad general predice que

(d) Ninguno de los anteriores.

(a) la luz que sale del Sol se enlentece por la gravedad.

8. Conforme una fuente de luz parpadeante que se aproxima a ti

(b) la luz que pasa junto al Sol se desvía.

gana rapidez, ves que la frecuencia de los destellos

(c) un reloj en la superficie del Sol corre más rápido que en

(a) aumenta.

la Tierra.

(b) disminuye.

(d) Todos los anteriores.

(c) permanece invariable.

18. Si una estrella que está a 20 años-luz de la Tierra explota, las

(d) Ninguno de los anteriores.

ondas gravitacionales provenientes de la explosión llegarían

9. A rapideces muy altas, un objeto aparece a un observador en

a la Tierra en

reposo como

(a) menos de 20 años. (c) más de 20 años.

(a) más corto en la dirección de viaje.

(b) 20 años.

(d) Ninguno de los anteriores.

(b) encogido en todas direcciones.

(c) más corto en la dirección perpendicular al viaje.

Después de hacer elecciones razonadas y discutirlas con tus amigos,
(d) más largo en todas direcciones.

encuentra las respuestas en la página S-1.

Epílogo

Espero que hayas disfrutado Física conceptual y valores ¿Descubriría el ser humano que su ciencia está equivocada, tu conocimiento de la física como un componente

que no ha avanzado lo suficiente? Los científicos en realidad

importante de tu educación general —un estudio

recibirían con gusto esa noticia porque siempre dan por sen-

de las reglas de la naturaleza que puede enriquecer

tado que el conocimiento actual es tentativo, sujeto no sólo a

tu manera de ver el mundo—. Cuán fascinante es que tantas

revisión sino también a sustitución. ¿Descubrirían que las reli-

cosas en la naturaleza estén interconectadas y que haya fenóme-

giones, todas ellas, están equivocadas, son demasiado rústicas y

nos que parecen diversos y sigan las mismas reglas básicas: una

sólo son los primeros pasos hacia una apreciación más plena de

manzana que cae sigue las mismas reglas que una estación espa-

la naturaleza y del lugar de la humanidad en el Universo?

cial en órbita terrestre, lo rojizo del cielo al atardecer se relaciona

Cuando el influyente físico Richard Feynman decía que

con su azulado a mediodía y la electricidad y el magnetismo

no sabía nada, se refería a que, comparado con lo que toda-

se unen para formar luz. Las conexiones entre las cosas son la

vía está por conocerse, su conocimiento (y el del resto de las

base de la ciencia. Pero el valor de la ciencia rebasa estas co-

personas) era escaso. ¿Acaso el ser humano tiene que espe -

nexiones: es una manera de pensar. Conforme aumenta el

rar mensajes del espacio exterior para sentirse estimulado a

conocimiento, también aumenta el pensamiento. Y con el pen-

tener una visión más completa de la naturaleza y de su lu-

samiento, también aumenta tu capacidad para dar forma a este

gar en ella? Para algunos, tristemente así es. Pero no para un

mundo que habitas y lograr una vida mejor para todos.

número cada vez mayor de personas imaginativas que adop-
Cuando era niño, se pensaba que la Tierra era excepcional
tan una actitud escéptica hacia todo conocimiento. En la ac-
en el Universo, el único lugar con vida inteligente, con la certe-
tualidad, más personas destinan sus energías intelectuales y
za de que los seres humanos eran especiales; y, más aun, incluso
emocionales a la solución de los problemas locales y globales.
sagrados. Más tarde recuerdo mi impresión cuando me enteré
Cada vez más y más personas cobran conciencia de que la
que existen más estrellas en el Universo que granos de arena en
Tierra es su casa, aun cuando sea sólo una de muchas casas
las playas de la Tierra. ¡Hoy se llega a la conclusión de que exis-
en este magnífico Universo. Los esfuerzos de las personas que
ten más planetas que estrellas ahí afuera! La suposición de que
dan lo mejor de sí están brindando a la Tierra los cuidados
sólo este rincón del Universo tiene vida inteligente es puesta en
que necesita y están elevando las condiciones de vida del ser
duda como nunca antes. Y si los seres humanos se comunicaran
humano. Estoy optimista de que la razón prevalecerá.
con seres avanzados "allá afuera", ¿qué podrían aprender?
Me quito el sombrero ante las formas racionales de pensar.

A P É N D I C E A

Sobre la medición y la

conversión de unidades

Dos sistemas principales de medición destacan en el mundo de hoy: el sistema de unidades comunes de Estados Unidos (USCS, por sus siglas en inglés, antes llamado sistema británico de unidades), que se utiliza en Estados Unidos y anteriormente en Myanmar, y el Système International (SI) (conocido también como sistema internacional y como sistema métrico), que se utiliza en el resto del mundo. Cada sistema tiene sus propios estándares de longitud, masa y tiempo. Las unidades de longitud, masa y tiempo se denominan a veces unidades fundamentales porque, una vez que se seleccionan, otras cantidades pueden expresarse en sus términos.

Sistema de unidades comunes de Estados Unidos

Con base en el sistema imperial británico, el USCS es familiar para todos los que viven en Estados Unidos. Usa el pie como la unidad de longitud, la libra como la unidad de peso o fuerza y el segundo como la unidad de tiempo. En la actualidad, el USCS se está sustituyendo con el sistema internacional, rápido en la ciencia y la tecnología, así como en algunos deportes (pista y natación), pero con mucha lentitud en otras áreas y en algunas especialidades en las que el cambio parece no llegar nunca.

Por ejemplo, se seguirán comprando asientos en la línea de la yarda 50. Recuerda las películas fotográficas en milímetros y los discos compactos en pulgadas.

Para medir el tiempo, no hay diferencia entre los dos sistemas, excepto que en el SI puro la única unidad es el segundo (s, no seg) con prefijos; sin embargo, en general, el minuto, la hora (h, no hr), el día, el año, etc., son aceptados en el USCS.

Système International

Durante la Conferencia Internacional de Pesos y Medidas de 1960, realizada en París, las unidades del SI se definieron y recibieron un estatus. En la Tabla A.1 se indican las unidades SI y sus símbolos. El SI se basa en el sistema métrico, que fue creado por científicos franceses después de la Revolución Francesa y se oficializó en 1799. Gracias a que es un sistema ordenado, es útil para el trabajo científico, y lo usan científicos de todo el mundo. El sistema métrico se divide en dos sistemas de unidades. En uno de ellos la unidad de longitud es el metro, la unidad de masa es el kilogramo y la unidad de tiempo es el segundo. A éste se le llama sistema metro-kilogramo-

segundo (mks) y es el preferido en física. El otro es el sistema centímetro-gramo-segundo (cgs) que, debido a sus valores más pequeños, es el favorito en la química. Las unidades cgs y mks se relacionan 703

704

APÉNDICE A

T A B L A A . 1 UNIDADES SI

Cantidad

Unidad

Símbolo

Longitud

metro

m

Masa

kilogramo

kg

Tiempo

segundo

s

Fuerza

newton

N

Energía

joule

J

Corriente

ampere

A

Temperatura

kelvin

K

T A B L A A . 2 CONVERSIONES ENTRE DIFERENTES UNIDADES DE LONGITUD

Unidad de longitud

Kilómetro

Metro

Centímetro

Pulgada

Pie

Milla

1 kilómetro

5 1

1,000

100,000

39,370

3,280.84

0.62140

1 metro

5 0.00100

1

100

39.370

3.28084

6.21104

1 centímetro

5 1.0105

0.0100

1

0.3937

0.032808

6.21106

1 pulgada

5 2.54105

0.0254

2.54

1

0.08333

1.58105

1 pie

5 3.05104

0.3048

30.48

12

1

1.89104

1 milla

5 1.60934

1,609.34

160,934

63,360

5,280

1

entre sí del modo siguiente: 100 centímetros igual 1 metro; 1,000 gramos son igual a 1 kilogramo. La Tabla A.2 menciona varias unidades de longitud relacionadas entre sí.

La ventaja principal de un sistema métrico es que utiliza el sistema decimal, en el cual todas las unidades pueden convertirse a unidades más pequeñas o más grandes al dividir o multiplicar por 10. Los prefijos dados en la Tabla A.3 suelen utilizarse para mostrar las relaciones entre unidades.

T A B L A A . 3 ALGUNOS PREFIJOS

Prefijo

Definición

nano-

1 mil millonésima: 1 nanosegundo es 1 mil millonésima de segundo

micro-

1 millonésima: 1 microsegundo es 1 millonésima de segundo

mili-

1 milésima: 1 miligramo es 1 milésima de gramo

centi-

1 centésima: 1 centímetro es 1 centésimo de metro

kilo-

1 mil: 1 kilogramo es 1,000 gramos

mega-

1 millón: 1 megahertz es 1 millón de hertz

giga-

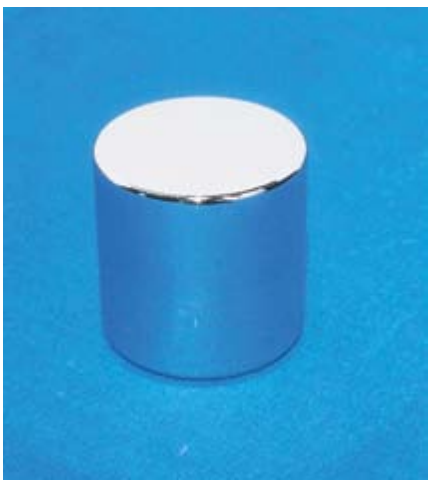
1 mil millones: 1 gigahertz son mil millones de hertz

Metro

El estándar de longitud del sistema métrico originalmente se definió en términos de la distancia del polo norte al ecuador. En esa época, se estableció que esta distancia era igual a 10,000 kilómetros. Una diezmillonésima de esto, el metro, se determinó con sumo cuidado y se marcó mediante rayas sobre una barra de aleación de platino-iridio.

Esta barra se conserva en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas en Francia.

Después, el metro estándar en Francia se calibró en términos de la longitud de onda



de la luz: en 1960, como 1,650,763.73 veces la longitud de onda de la luz anaranjada emitida por los átomos del gas criptón-86. En

1983 se definió como la longi -

tud de la trayectoria recorrida por la luz en un vacío durante un intervalo de 1/299,792,458 de segundo.

Kilogramo

La unidad estándar de masa, el kilogramo, es un bloque de aleación platino-iridio, también conservado en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas en Francia (Figura A.1). El kilogramo es igual a 1,000 gramos. Un gramo es la masa de 1 centímetro cúbico (cc) de agua a una temperatura de 4C. (La libra estándar se define en términos del kilogramo estándar; la masa de un objeto que pesa 1 libra es igual a 0.4536 kilogramo.) F I G U R A A . 1

Segundo

El kilogramo estándar.

La unidad oficial de tiempo tanto en el USCS como en el SI es el segundo. Hasta 1956 se definió en términos del día solar medio, el cual se dividió en 24 horas.

Cada hora se dividió en 60 minutos y cada minuto en 60 segundos. Por tanto, había 86,400 segundos por día, y el segundo se definió como 1/86,400 del día solar medio.

Esto resultó insatisfactorio porque la tasa de rotación de la Tierra es gradualmente más lenta. En 1956 se eligió el día solar medio de 1900 como el estándar sobre el cual basar el segundo. En 1964, el segundo se definió oficialmente como el tiempo que tarda un átomo de cesio-133 en realizar 9,192,631,770 vibraciones.

Newton

Un newton es la fuerza necesaria para acelerar 1 kilogramo a 1 metro por segundo por segundo. Esta unidad se llama así en honor a sir Isaac Newton.

Joule

Un joule es igual a la cantidad de trabajo realizado por una fuerza de 1 newton que actúa sobre una distancia de 1 metro. En 1948, la Conferencia Internacional de Pesos y Medidas adoptó el joule como la unidad de energía. Por tanto, el calor específico del agua a 15C ahora se indica como 4,185.5 joules por kilogramo por grado

Celsius.

Esta cifra siempre está asociada al equivalente mecánico del calor: 4.1855 joules por caloría.

Ampere

El ampere se define como la intensidad de corriente eléctrica constante que, cuando se mantiene en dos conductores paralelos de longitud infinita, sección transversal despreciable, y separados 1 metro en el vacío, producirían entre ellos una fuerza igual a 2 3 1027 newton por metro de longitud. Cuando se abordó la corriente eléctrica en este texto, se utilizó la definición del ampere no tan oficial, pero más fácil de comprender,

706

APÉNDICE A

que indica que es la tasa de flujo de 1 coulomb de carga por segundo, donde 1 coulomb es la carga de 6.251018 electrones.

Kelvin

La unidad fundamental de temperatura recibe su nombre del científico William Thompson, lord Kelvin. El kelvin se define como 1/273.15 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua (el punto fijo al cual el hielo, el agua líquida y el vapor de agua coexisten en equilibrio). Esta definición se adoptó en 1968 cuando se decidió cambiar el nombre de grado Kelvin (K) a kelvin (K). La temperatura de fusión del hielo a presión atmosférica es 273.15 K. La temperatura a la cual la presión de vapor del agua pura es igual a la presión atmosférica estándar es 373.15 K (la temperatura del agua en ebullición a presión atmosférica estándar).

Área

La unidad de área es un cuadrado que tiene una unidad estándar de longitud como lado.

En el USCS, es un cuadrado con lados que tienen 1 pie de longitud, llamado 1 pie cuadrado y escrito 1 ft2. En el sistema internacional, es un cuadrado con lados que miden 1 metro de largo, lo que constituye un área de 1 m2. En el sistema cgs es 1 cm2. El área de una superficie dada se especifica por el número de pies cuadrados, metros cuadrados o 1 cm 1 cm2

centímetros cuadrados que cabrían en ella. El área de un rectángulo es igual a la base por la altura. El área de un círculo es igual a r 2, donde es la razón entre la circunferencia F I G U R A A . 2

de un círculo y su diámetro, aproximadamente 3.14. Las fórmulas para las áreas de otros Cuadrado unidad o cuadrado

objetos pueden encontrarse en libros de geometría o en Internet.

unitario.

Volumen

El volumen de un objeto se refiere al espacio que ocupa. La unidad de volumen es el espacio ocupado por un cubo que tiene una unidad estándar de longitud en su borde. En la USCS, una unidad de volumen es el espacio ocupado por un cubo de 1 pie por borde y se llama 1 pie cúbico; se escribe 1 ft3. En el sistema métrico, es el espacio ocupado por un cubo con lados de 1 metro (SI) o 1 centímetro (cgs). Se escribe 1 m3 o 1 cm3 (o cc). El volumen de un espacio determinado se especifica por el número de pies cúbicos, metros cúbicos o centímetros cúbicos que cabrían en él.

En el USCS, los volúmenes pueden medirse en cuartos, galones y pulgadas cúbicas, así como en pies cúbicos. En 1 ft3. hay 1,728 (12 3 12 3 12) pulgadas cúbicas. Un galón estadounidense es un volumen de 231 in3. Cuatro cuartos es igual a 1 galón.

F I G U R A A . 3

En el SI, los volúmenes también se miden en litros. Un litro es igual a 1,000 cm3. Un Volumen unidad o volumen

litro equivale aproximadamente a 1.06 cuartos.

unitario.

S O BRE L A M ED I C I Ó N Y L A CO N V ER S I Ó N DE U N I DA DES

707

Conversión de unidades

Con frecuencia, en la ciencia, y especialmente en el ámbito del laboratorio, es necesario convertir de una unidad a otra. Para hacerlo, sólo necesitas multiplicar la cantidad dada por el factor de conversión apropiado.

Todos los factores de conversión pueden escribirse como razones en las que numerador y denominador representan la cantidad equivalente expresada en unidades diferentes. Debido a que cualquier cantidad dividida entre sí misma es igual a 1, todos los factores de conversión son físicamente iguales a 1. Por ejemplo, los siguientes dos factores de conversión se derivan ambos de la relación 100 centímetros 1 metro: 100 centímetros

1 metro

= 1

= 1

1 metro

100 centímetros

Puesto que todos los factores de conversión son físicamente iguales a 1, multiplicar una cantidad por un factor de conversión no cambia el valor de la cantidad. Lo que cambia son las unidades y la cantidad de dichas unidades. Supón que mides un objeto que tiene 60 centímetros de longitud. Para convertir esta medición a metros, la multiplicas por el factor de conversión que te permita cancelar los centímetros.

P U N T O D E C O N T R O L

Convierte 60 centímetros a metros.

COMPRUEBA TU RESPUESTA

(

1 metro

60 centímetros)

(

)

(

0.6 metros

100 centímetros) =

↑

↑

↑

cantidad en

factor de

cantidad en

centímetros

conversión

metros

Para derivar un factor de conversión, consulta una tabla que presente igualdades entre unidades, como la Tabla A.2, o la que se encuentra en el forro de este libro. Luego multiplica la cantidad dada por el factor de conversión y, ¡voilá! : las unidades se convierten. Siempre ten cuidado de apuntar tus unidades. Son tu guía final, que te dicen qué números van en cada lugar y si estás escribiendo adecuadamente la ecuación.

A P É N D I C E B

Más sobre el movimiento

Cuando se describe el movimiento de algo, se indica cómo se mueve con respecto a algo más (Capítulo 3). En otras palabras, el movimiento exige un marco de referencia (un observador, origen y ejes). Tienes la libertad de elegir la ubicación de este marco y de moverlo con respecto a otro marco. Cuando tu marco en movimiento tiene una aceleración cero, éste se llama un marco inercial. En un marco inercial, la fuerza hace que un objeto acelere en concordancia con las leyes de Newton.

Cuando el marco de referencia es acelerado, se observan fuerzas y movimientos ficticios (Capítulo 8). Las observaciones desde un tiovivo, por ejemplo, son diferentes cuando gira que cuando está en reposo. Las descripciones del movimiento y la fuerza dependen de tu "punto de vista".

Se distingue entre la rapidez y la velocidad (Capítulo 3). La rapidez es qué tanto se mueve algo, o la tasa de cambio de la posición en el tiempo (excluida la dirección): una cantidad escalar. La velocidad incluye la dirección del movimiento: una cantidad vectorial cuya magnitud es la rapidez. Los objetos que se mueven con una velocidad constante se mueven la misma distancia en el mismo tiempo y en la misma dirección.

Otra diferencia entre rapidez y velocidad tiene que ver con la diferencia entre distancia y cambio de posición, o desplazamiento. La rapidez es la distancia por duración, en tanto que la velocidad es el desplazamiento por duración. El desplazamiento difiere de la distancia. Por ejemplo, una persona que viaja 10 kilómetros de ida al trabajo y también de regreso, recorre 20 kilómetros pero no "va" a ninguna parte. La distancia recorrida es de 20 kilómetros y el desplazamiento es cero. Aunque la rapidez instantánea y la velocidad instantánea tienen el mismo valor en el mismo instante, la rapidez promedio y la velocidad promedio pueden ser muy

diferentes. La rapidez promedio del viaje redondo de esta persona es de 20 kilómetros dividida entre el tiempo del viaje total: un valor mayor que cero. Pero la velocidad promedio es cero. En ciencia, muy a menudo es más importante el desplazamiento que la distancia. (Para no sobrecargarte de información, no se abordó esta diferencia en el texto.) La aceleración es la tasa a la que cambia la velocidad. Puede ser un cambio sólo de rapidez, un cambio sólo de dirección o ambos. Al frenado con frecuencia se le denomina desaceleración.

En el espacio y el tiempo newtonianos, el espacio tiene tres dimensiones (longitud, ancho y altura), cada una con dos direcciones. Puedes ir, detenerte y regresar en cualquiera de ellos. El tiempo tiene una dimensión, con dos direcciones: pasado y futuro.

No puedes detenerte y regresar, sólo ir. En el espacio-tiempo einsteiniano se combinan estas cuatro dimensiones (Capítulo 35).

Cómo calcular la velocidad y la distancia

recorrida sobre un plano inclinado

Recuerda, del Capítulo 2, los experimentos de Galileo con planos inclinados. Piensa en un plano inclinado de tal modo que la rapidez de una bola que rueda aumenta a la tasa de 2 metros por segundo a cada segundo: una aceleración de 2 m/s2. En el instante cuando comienza a moverse, la velocidad de la bola es cero; 1 segundo después, rueda a 2 m/s; al final del siguiente segundo, 4 m/s; al final del siguiente segundo, 709

6 m/s, y así sucesivamente. Si la bola parte del reposo, su velocidad en cualquier instante es simplemente:

velocidad 5 aceleración 3 tiempo

o, en notación abreviada,

v 5 at

(Suele omitirse el signo de multiplicación, 3, cuando se expresan relaciones en forma matemática. Cuando dos símbolos se escriben juntos, como el at en este caso, se entiende que se multiplican.)

Qué tan rápido rueda la bola es una cosa; qué tan lejos rueda es otra. Para entender la relación entre la aceleración y la distancia recorrida, primero debes investigar la rela-v = 0 v = d = ?

ción entre la velocidad instantánea y la velocidad promedio. Si la bola que se muestra en t

m

v = 2 s

la Figura B.1 parte del reposo, rodará una distancia de 1 metro en el primer segundo.

Pregunta: ¿cuál será su rapidez promedio? La respuesta es 1 m/s (porque cubre 1 metro 1 m

en el intervalo de 1 segundo). Pero ya viste que la velocidad instantánea al final del primer segundo es 2 m/s. Dado que la aceleración es uniforme, el promedio en cualquier F I G U R A B . 1

intervalo de tiempo se encuentra de la misma forma que suele encontrarse el promedio La bola rueda 1 m por el plano

de cualesquiera dos números: se suman y se dividen entre 2. (¡Ten cuidado de no hacer inclinado en 1 s y alcanza una

esto cuando la aceleración no sea uniforme!) De este modo, si sumas la rapidez inicial rapidez de 2 m/s. Sin embargo,

(cero en este caso) y la rapidez final de 2 m/s y luego divides entre 2, obtienes 1 m/s su rapidez promedio es 1 m/s.

¿Ves por qué?

para la velocidad promedio.

En cada segundo sucesivo se ve que la bola rueda una mayor distancia por la misma pendiente en la Figura B.2. Observa que la distancia recorrida en el segundo intervalo de tiempo es de 3 metros. Esto es así porque la rapidez promedio de la bola en este intervalo es 3 m/s. En el siguiente intervalo de 1 segundo, la rapidez promedio es 5 m/s, de modo que la distancia recorrida es 5 metros. Es interesante ver que los incrementos sucesivos de distancia aumentan en una secuencia de números nones. ¡No hay duda de que la naturaleza sigue reglas matemáticas!

F I G U R A B . 2

Si la bola recorre 1 m durante

su primer segundo, entonces,

4

9

1

16

en cada segundo sucesivo,

3

25

recorrerá la secuencia de

5

números nones 3, 5, 7, 9 m,

7

y así sucesivamente. Observa

que la distancia total recorrida

9

aumenta como el cuadrado del

tiempo total.

P U N T O D E C O N T R O L

Durante el lapso del segundo intervalo de tiempo, la bola comienza a 2 m/s y termina a 4 m/s. ¿Cuál es la rapidez promedio de la bola durante este intervalo de 1 s? ¿Cuál es su aceleración?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

rapidez inicial

rapidez final

Rapidez promedio =

+

2

= 2 m/s + 4 m/s = 3 m/s

2

cambio en velocidad

Aceleración = intervalo de tiempo

4 m/s −

=

2 m/s = 2 m/s = 2 m/s2

1 s

1 s

M Á S S O BRE EL M OV I M I EN TO

711

Examina con cuidado la Figura B.2 y observa la distancia total recorrida a medida que la bola acelera por el plano. Las distancias van desde cero hasta 1 metro en 1 segundo, cero a 4 metros en 2 segundos, cero a 9 metros en 3 segundos, cero a 16 metros en 4

segundos, y así en los segundos sucesivos. La secuencia de distancias totales recorridas es de los cuadrados del tiempo. Se examinará más de cerca la relación entre distancia recorrida y el cuadrado del tiempo para aceleración constante en el caso de caída libre.

Cómo calcular la distancia cuando

la aceleración es constante

¿Cuánto caerá un objeto que se suelta desde el reposo en un tiempo dado? Para responder esta pregunta, considera el caso en el cual el objeto cae libremente durante 3 segundos, a partir del reposo. Si ignoras la resistencia del aire, el objeto tendrá una aceleración constante de más o menos 10 metros por segundo cada segundo (en realidad, alrededor de 9.8 m/s2, pero se quiere que los números sean fáciles de seguir).

Velocidad al comienzo 0 m/s

Velocidad al final de 3 segundos (10 3) m/s

Velocidad promedio 12 la suma de esas dos rapideces

12 (0 10 3) m/s

12 10 3 15 m/s

Distancia recorrida velocidad promedio tiempo

(12 10 3) 3

12 10 32 45 m

Puedes ver, a partir de los significados de estos números, que:

Distancia recorrida 12 aceleración 3 tiempo al cuadrado

Esta ecuación es válida para un objeto que cae no sólo durante 3 segundos, sino cualquier duración de tiempo, en tanto la aceleración sea constante. Si d representa la distancia recorrida, a la aceleración y t el tiempo, la regla puede escribirse, en notación abreviada, como:

d 12 at 2

Esta relación la dedujo por primera vez Galileo. Él razonó que, si un objeto cae durante, por decir, el doble de tiempo, caerá con el doble de rapidez promedio. Puesto que cae durante el doble de tiempo al doble de rapidez promedio, caerá cuatro veces más lejos. De igual modo, si un objeto cae durante tres veces el tiempo, éste tendrá una rapidez promedio tres veces más grande y caerá nueve veces más lejos. Galileo razonó que la distancia total de caída debe ser proporcional al cuadrado del tiempo.

En el caso de objetos en caída libre, suele usarse la letra g para representar la aceleración en lugar de la letra a (g porque la aceleración se debe a la gravedad). Aunque el valor de g varía un poco en diferentes partes del mundo, es aproximadamente igual a 9.8 m/s2 (32 ft/s2). Si usas g para la aceleración de un objeto en caída libre (resistencia del aire despreciable), las ecuaciones para los objetos que caen a partir de una posición de reposo se convierten en:

v gt

d 12 gt 2

Mucha de la dificultad para aprender física, lo mismo que cualquier disciplina, tiene que ver con aprender el lenguaje: los muchos términos y definiciones. La rapidez es un poco diferente de la velocidad, y la aceleración es muy diferente de la rapidez o de la velocidad.

P U N T O D E C O N T R O L

1. Un automóvil que parte del reposo tiene una aceleración constante de 4 m/s2. ¿Cuánto recorrerá en 5 s?

2. ¿Cuánto caerá un objeto soltado desde el reposo en 1 s? En este caso la aceleración es g 9.8 m/s2.

3. Si un objeto tarda 4 s en caer libremente al agua cuando se suelta desde el puente Golden Gate, ¿qué tan alto está el puente?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. Distancia = 12 4 52 50 m

2. Distancia = 12 9.8 12 4.9 m

3. Distancia = 12 9.8 42 78.4 m

Observa que las unidades de medición cuando se multiplican producen las unidades adecuadas de metros para distancia:

d = 1 × 9.8 m/s 2 × 16s 2 = 78.4 m

2

La masa y el peso se relacionan, pero son diferentes entre sí. Lo mismo sucede con el trabajo, el calor y la temperatura. Por favor, sé paciente contigo mismo, ya que aprender las semejanzas y diferencias entre los conceptos físicos no es tarea sencilla.

Hasta el momento las ecuaciones para rapidez y distancia han sido para casos que parten del reposo. ¿Y qué hay de los objetos que experimentan una aceleración uniforme y no parten del reposo? Un poco de razonamiento te mostrará que:

v v at

0

d v t 1

0

2 at 2

Simplemente se agregaron las condiciones iniciales: la velocidad que comienza con v y la distancia recorrida aumentada por v t. El sentido común te dirá que, cuando la 0

0

aceleración es cero, estas ecuaciones se convierten en:

v v 0

d v t 0

A P É N D I C E C

Elaboración de gráficas

Gráficas: una forma de expresar

y

relaciones cuantitativas

Las gráficas, al igual que las ecuaciones y las tablas, muestran cómo se relacionan dos o más cantidades entre sí.

Dado que investigar las relaciones entre cantidades constituye mucho del trabajo de la física, las ecuaciones, las tablas y las gráficas son herramientas importantes para la física.

Las ecuaciones son la forma más concisa de describir relaciones cuantitativas. Por ejemplo, considera la ecuación

x

F I G U R A C . 1

v 5 v 0 1 gt. Describe de manera compacta cómo la velocidad de un

objeto en caída libre depende de su velocidad

cionalidad directa es un tipo de relación lineal. Las relaciones inicial, la aceleración debida a la gravedad y el tiempo. Las

lineales tienen gráficas en línea recta, el tipo de gráficas más

ecuaciones son expresiones abreviadas de relaciones entre

sencillo de interpretar. En la gráfica que se muestra en la Fi-

cantidades.

gura C.1, la línea recta continua que se eleva de izquierda a

Las tablas proporcionan valores de variables en forma

derecha te dice que, conforme x aumenta, y aumenta. De ma-de lista. La dependencia de v sobre t en v 5 v nera más específica, muestra que y aumenta a una tasa cons-0 1 gt puede

mostrarse con una tabla que mencione varios valores de v

tante con respecto a x. Conforme x aumenta, y aumenta. La para correspondientes tiempos t. La Tabla 3.2 de la página

gráfica de una proporcionalidad directa con frecuencia pasa

46 es un ejemplo. Las tablas son especialmente útiles cuan-

a través del "origen", el punto en la esquina inferior izquierda

do la relación matemática entre las cantidades se desconoce,

donde x 0 y y 0. Sin embargo, en la Figura C.1 se ve que o cuando tienen que proporcionarse valores numéricos con

la gráfica comienza donde y tiene un valor distinto de cero

un alto grado de exactitud. Además, las tablas permiten re-

cuando x 0. El valor de y tiene una "ventaja".

gistrar datos experimentales.

La Figura C.2 muestra una gráfica de la ecuación v 5

Las gráficas son una representación visual de las relacio-

v 1 gt. La rapidez v se grafica a lo largo del eje y, y el 0

nes entre las cantidades. Cuando se observa la forma de una

tiempo t a lo largo del eje x. Como puedes ver, hay una gráfica, se puede decir con rapidez mucho acerca de cómo

relación lineal entre v y t. Observa que la rapidez inicial es se relacionan las variables. Por esta razón, las gráficas ayu-10 m/s. Si la rapidez inicial fuese 0, como cuando sueltas

dan a aclarar el significado de una ecuación o una tabla

un objeto desde el reposo, entonces la gráfica intersecaría el

de números. Y, cuando la ecuación todavía no se conoce,

origen, donde tanto v como t son 0. Observa que la gráfica una gráfica puede ayudar a revelar la relación entre las va-se origina en v 10 m/s cuando t 0, lo que muestra una riables. A menudo los datos experimentales se grafican por

"ventaja" de 10 m/s.

esta razón.

Las gráficas son útiles en otra forma. Si una gráfica con-

60

tiene suficientes puntos, puede servir para estimar valores

entre los puntos (interpolación) o valores después de los

50

puntos (extrapolación).

40

Gráficas cartesianas

30

L

v (m/s)

a gráfica más común y útil en ciencia es la gráfica car-

20

tesiana. En una gráfica cartesiana, los posibles valores

de una variable se representan sobre el eje vertical (llamado

10

eje y) y los posibles valores de la otra variable se grafican sobre el eje horizontal (eje x).

La Figura C.1 muestra una gráfica de dos variables, x y y, 0

1

2

3

4

5

que son directamente proporcionales una a la otra. Una propor-t (s)

F I G U R A C . 2

713

714

APÉNDICE C

125

50

100

40

75

30

d (m) 50

v (m/s) 20

25

10

0

1

2

3

4

5

0

1

2

3

4

5

t (s)

t (s)

F I G U R A C . 3

F I G U R A C . 5

Sin embargo, muchas relaciones significativas en térmi-

la aceleración debida a la gravedad. Por el contrario, consi-

nos físicos son más complicadas que las relaciones lineales.

dera la gráfica de la Figura C.5, que es una línea recta hori-

Si duplicas el tamaño de una habitación, el área del suelo

zontal. Su pendiente de cero muestra una aceleración cero;

aumenta cuatro veces; triplicar el tamaño de la habitación

esto es: rapidez constante. La gráfica muestra que la rapidez es

incrementa el área del suelo nueve veces, y así sucesivamen-

30 m/s a lo largo de todo el intervalo de 5 segundos. La tasa

te. Éste es un ejemplo de una relación no lineal. La Figura

de cambio, o pendiente, de la rapidez con respecto al tiempo

C.3 muestra una gráfica de otra relación no lineal: distancia

es cero: no hay cambio en la rapidez en absoluto.

frente a tiempo en la ecuación de caída libre desde el reposo,

El área bajo la curva es una característica importante de una

d 5 ½ gt 2.

gráfica porque a menudo tiene una interpretación física. Por

La Figura C.4 muestra una curva de radiación. La curva

ejemplo, considera el área bajo la gráfica de v contra t que se (o gráfica) muestra la relación no lineal más bien compleja

muestra en la Figura C.6. La región sombreada es un rectángu-

entre la intensidad I y la longitud de onda de la radiación

lo con lados de 30 m/s y 5 s. Su área es 30 m/s 3 5 s 150 m.

para un objeto que brilla a 2,000 K. La gráfica muestra

En este ejemplo, el área es la distancia cubierta por un objeto

que la radiación es más intensa cuando es igual a aproxi-

que se mueve con una rapidez constante de 30 m/s durante

madamente 1.4 m. ¿Cuál es más brillante: la radiación a

5 s (d 5 vt).

0.5 m o la radiación a 4.0 m? La gráfica rápido te dice

que la radiación a 4.0 m es mucho más intensa.

50

50

40

40

m)

T = 2,000 K

30

. 30

2

v (m/s) 20

20

I (W/cm

10

10

0

1

2

3

4

5

00 1

2

3

4

5

t (s)

F I G U R A C . 6

(m)

F I G U R A C . 4

El área no necesita ser rectangular. El área bajo cualquier

Pendiente y área bajo la curva

curva de v frente a t representa el cambio de posición en un intervalo de tiempo determinado. De igual modo, el área

bajo una curva de aceleración contra tiempo proporciona el

A partir de la pendiente y el área bajo la curva de una grá- cambio de velocidad en un intervalo de tiempo. El área bajo fica puede obtenerse información cuantitativa. La pen-una curva de fuerza contra tiempo proporciona el cambio de

diente de la gráfica en la Figura C.2 representa la tasa a la

cantidad de movimiento. (¿Qué proporciona el área bajo una

que v aumenta con relación a t. Para calcularla se divide un curva de fuerza contra distancia?) El área no rectangular bajo

segmento v a lo largo del eje y entre un segmento corres-varias curvas que representan funciones, incluidas algunas

pondiente t a lo largo del eje x. Por ejemplo, al dividir v de más bien complicadas, puede encontrarse gracias a una im-30 m/s entre t de 3 s produce v/ t 5 10 m/ss 10 m/s2, portante rama de las matemáticas: el cálculo integral.

EL A BO R AC I Ó N DE G R Á FI C A S

715

Elaboración de gráficas con Física conceptual

Puedes desarrollar habilidades básicas para crear gráficas en la sección de laboratorio de este curso. Los laboratorios “Sonic Ranger” y “Go! Go! Go!” te introducen a los conceptos de gráficas del movimiento. “Motivating the Moving Man” usa una si-mulación por computadora que genera gráficas de movimiento. Tanto “Force

Mirror”

como “Sonic Ranger” tienen que ver con gráficas generadas por sensores con sensores de fuerza en lugar de sensores de movimiento. “Totally Stressed Out” requiere la elaboración manual de gráficas de datos de la ley de Hooke. El laboratorio “The Weight”

pone énfasis en la interpretación de la pendiente de una gráfica. En “Water Waves in an Electric Sink” y “High Quiet Low Loud” verás cómo pueden usarse las gráficas para representar ondas y sonidos.

En la sección de laboratorio de tu curso de Física conceptual también aprenderás que las computadoras pueden graficar datos por ti. No eres ningún holgazán cuando graficas tus datos con un programa de software. En vez de invertir tiempo y energía en escalar los ejes y colocar los puntos, aprovechas tu tiempo y energía para investigar el significado de la gráfica, ¡un nivel superior de pensamiento!

P U N T O D E C O N T R O L

La Figura C.7 es una representación gráfica de una bola soltada en una mina.

50

40

30

v (m/s) 20

10

0

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

t (s)

F I G U R A C . 7

1. ¿Cuánto tardará la bola en golpear el fondo?

2. ¿Cuál era la rapidez de la bola cuando golpeó el fondo?

3. ¿Qué te dice la disminución de la pendiente de la gráfica acerca de la aceleración de la bola con el aumento de rapidez?

4. ¿La bola alcanzó una rapidez terminal antes de golpear el fondo del pozo? Si es así, ¿aproximadamente cuántos segundos tardó en llegar a su rapidez terminal?

5. ¿Cuál es la profundidad aproximada del pozo de la mina?

C O M P R U E B A T U S R E S P U E S T A S

1. 9 s.

2. 24 m/s.

3. La aceleración disminuye conforme la rapidez aumenta (debido a resistencia del aire).

4. Sí (dado que la pendiente se curva a cero), aproximadamente 7 s.

5. La profundidad es de unos 170 m. (El área bajo la curva es de más o menos 17 cuadrados, cada uno de los cuales representa 10 m.)

A P É N D I C E D

Aplicaciones de los vectores

Los vectores se presentaron en los Capítulos 2-5. Recuer- 3. Si consideras las componentes del peso de un objeto da que una cantidad vectorial es una cantidad dirigida,

que rueda por un plano inclinado, puedes ver por qué

especificada tanto por su magnitud como por su dirección.

su rapidez depende del ángulo. Observa que cuanto

Los vectores pueden representarse con flechas, donde la lon-

más inclinado sea el plano, más grande se vuelve la

gitud de la flecha corresponde a la magnitud y la punta de la

componente S y más rápido rueda el objeto. Cuando

flecha muestra la dirección. Los vectores que se suman son

el plano es vertical, S se vuelve igual al peso y el objeto

vectores componentes. La suma de los vectores componentes

logra una máxima aceleración, 9.8 m/s2. Hay dos

es la resultante.

vectores más de fuerza que no se muestran: la fuerza

normal N, que es igual y tiene dirección opuesta a D, y Ejemplos de vectores

la fuerza de fricción f, que actúa en el contacto entre el

barril y el plano.

y sus componentes

1. Ernie Brown empuja una podadora y aplica una fuerza

que la empuja hacia adelante y también contra el

S

D

suelo. En la Figura D.1, F representa la fuerza apli-

D

S

cada por Ernie. Esta fuerza puede separarse en dos

D

S

componentes. El vector D representa la componente

F I G U R A D . 3

WT

WT

WT

descendente, y S es la componente lateral, la fuerza

que mueve la podadora

4. Cuando el aire en movimiento golpea la superficie

hacia adelante. Si conoces

inferior del ala de un avión, la fuerza del aire que

la magnitud y la dirección

S

impacta contra el ala puede representarse con un solo

del vector F, puedes estimar

vector perpendicular al plano del ala (Figura D.4).

la magnitud de las compo-

El vector de fuerza se representa actuando a medio

nentes a partir del diagrama

camino a lo largo de la superficie

vectorial.

D

F

inferior del ala, donde está el

U

F

2. ¿Sería más fácil empujar o

F I G U R A D . 1

punto, y apunta arriba del ala

jalar una carretilla arriba de un escalón? La Figura D.2

para mostrar la dirección resul-

muestra la fuerza en el centro de la rueda. Cuando

tante de la fuerza de impacto del

empujas una carretilla, parte de la fuerza se dirige hacia

viento. Esta fuerza puede des-

S

abajo, lo que hace más difícil subir el escalón. Sin em-

componerse en dos componentes, FIGURA D.4

bargo, cuando la jalas, parte de la fuerza del jalón se di-

una lateral y la otra hacia arriba.

rige hacia arriba, lo que ayuda a levantar la rueda sobre

La componente ascendente, U,

el escalón. Observa que el diagrama vectorial sugiere

se llama sustentación. El componente lateral, S, se llama que empujar la carretilla puede que no suba la carretilla

arrastre aerodinámico. Si el avión debe volar con una

en absoluto. ¿Ves que la altura del escalón, el radio de

velocidad constante a altitud constante, entonces la sus-

la rueda y el ángulo de la fuerza aplicada determinan

tentación debe ser igual al peso del avión y el empuje de

si la carretilla puede empujarse sobre el escalón?

los motores del avión debe ser igual al arrastre. La mag-

¡Observa cómo los vectores ayudan a analizar una

nitud de la sustentación (y el arrastre) puede alterarse

situación y ver justo cuál es el problema!

si se cambia la rapidez del avión o el ángulo (llamado

ángulo de ataque) entre el ala y la horizontal.

5. Considera el satélite que se mueve en sentido de las

F

manecillas del reloj en la Figura D.5. En cada parte

S

U

de su trayectoria orbital, la fuerza gravitacional F lo

S

jala hacia el centro del planeta huésped. En la posi-

ción A, se ve a F separado en dos componentes: f, que

D

F

F I G U R A D . 2

es tangente a la trayectoria del proyectil, y f , que es

APLICACIONES DE LOS VECTORES

717

perpendicular a la trayectoria. Las magnitudes relativas

de estas componentes en comparación con la magni-

tud de F pueden verse en el rectángulo imaginario que

componen; f y f son los lados, y F es la diagonal. Se ve que la componente f está a lo largo de la trayectoria

F I G U R A D . 6

orbital pero contra la dirección del movimiento del sa-

télite. Esta componente de fuerza reduce la rapidez del

Botes de vela

satélite. La otra componente, f , cambia la dirección

SCREENCAST: Bote de vela en el viento

del movimiento del satélite y lo aleja de su tendencia a

ir en línea recta. De modo que la trayectoria del satélite

Los marineros siempre han sabido que un bote de vela

puede navegar a sotavento, en la dirección del viento.

se curva. El satélite pierde rapidez hasta que llega a

Sin embargo, los marineros no siempre han sabido que un

la posición B. En el punto más alejado del planeta

bote de vela puede navegar a barlovento, contra el viento.

(apogeo), la fuerza gravitacional es un poco más débil

Una razón para esto tiene que ver con una característica que

pero perpendicular al movimiento del satélite, y la

es común sólo en los botes de vela recientes: una quilla con

componente f se reduce a cero. La componente f , por

forma de aleta que se extiende profundo bajo el fondo del

otra parte, aumentó y ahora se fusiona por completo

bote para garantizar que el bote cortará a través del agua sólo

para convertirse en F. La rapidez en este punto no es

en dirección hacia adelante (o hacia

suficientemente alta como para una órbita circular, y

atrás). Sin una quilla, un bote de vela

el satélite comienza a caer hacia el planeta. Adquiere

podría voltearse hacia los lados.

V I E N T O

una rapidez porque la componente f reaparece y está

La Figura D.7 muestra un bote de

en la dirección del movimiento, como se muestra en

vela que navega directamente a sota-

la posición C. El satélite adquiere rapidez hasta que

vento. La fuerza del viento que im-

pasa alrededor de la posición D (perigeo), donde una

pacta contra la vela acelera al bote.

vez más la dirección del movimiento es perpendicular

Incluso si el arrastre del agua y todas

a la fuerza gravitacional, f se

las otras fuerzas de resistencia son des-

convierte por completo en F,

B

preciables, la rapidez máxima del bote

F

y f no existe. La rapidez excede

C

es la rapidez del viento. Esto se debe a FIGURA D.7

a la necesaria para una órbita

F

f

f

que el viento no hará un impacto con-

circular a esta distancia, y el

tra la vela si el bote se mueve tan rápido como el viento. El

F

satélite pasa rápidamente para

A

f

viento no tendría una rapidez relativa con el bote y la vela

repetir el ciclo. Su pérdida de

simplemente se pandearía. Sin fuerza, no hay aceleración. El

rapidez al ir de D a B iguala su

F

vector de fuerza en la Figura D.7 disminuye conforme el bote

ganancia en rapidez de B a D.

f

F

viaja más rápido. El vector de fuerza es máximo cuando el

Kepler descubrió que las trayec-

bote está en reposo y todo el impacto del viento llena la vela,

torias planetarias son elípticas,

y es mínimo cuando el bote viaja tan rápido como el viento.

D

pero nunca supo por qué. ¿Tú

Si el bote de algún modo es impulsado hasta una rapidez

lo sabes?

F I G U R A D . 5

mayor que la del viento (mediante un motor, por ejemplo),

entonces la resistencia del aire contra el lado frontal de la

6. Remítete a los Polaroid sostenidos por Ludmila en la

vela producirá un vector de fuerza con dirección opuesta.

Figura 29.34 del Capítulo 29.

Esto frenará al bote. Por tanto, el bote, cuando se impulsa

En la primera imagen (a), se ve que la luz se transmi-

sólo por el viento, no puede superar la rapidez del viento.

te a través del par de Polaroid porque sus ejes están

Si la vela se orienta en un ángulo

alineados. La luz que sale puede representarse como

con respecto al viento, como se mues-

un vector alineado con el eje de polarización de los

tra en la Figura D.8, el bote se moverá V I E N T O

Polaroid. Cuando los Polaroid se cruzan (b), no sale

hacia adelante, pero con menos acele-

luz porque la luz que atraviesa el primer Polaroid es

ración. Existen dos razones para esto:

perpendicular al eje de polarización del segundo Pola-

roid, sin componentes a lo largo de su eje. En la tercera

1. La fuerza sobre la vela es menor

imagen (c), se ve que la luz se transmite cuando un

porque la vela no intercepta tanto

tercer Polaroid queda en medio en un ángulo entre los

viento en esta posición angular.

F

Polaroid cruzados. La explicación de esto se muestra en

2. La dirección de la fuerza de im-

la Figura D.6.

pacto del viento sobre la vela no

F I G U R A D . 8

718

APÉNDICE D

está en la dirección de movimiento del bote sino que es

Un vehículo con vela puede navegar más rápido cortando el

perpendicular a la superficie de la vela. En términos

viento de lo que puede hacerlo navegando a sotavento.

generales, siempre que cualquier fluido (líquido o gas)

Por extraño que parezca, para

interactúa con una superficie lisa, la fuerza de interac-

lograr la rapidez máxima en la ma-

V I E N T O

ción es perpendicular a la superficie lisa. El bote no se*

yoría de los vehículos con vela se

mueve en la misma dirección que la fuerza perpendicu-

corta (contra) el viento; esto es, ¡al

lar sobre la vela, sino que está restringido a moverse

angular el vehículo en una direc-

en una dirección hacia adelante (o hacia atrás) por su

ción a barlovento! Aunque un bote

quilla.

de vela no puede navegar directa-

K F

Puedes comprender mejor el mo-

mente a barlovento, puede llegar a

vimiento del bote si descompones

un destino a barlovento al angular

T

V I E N T O

la fuerza del impacto del viento,

de ida y vuelta en zigzag. A esto se

F I G U R A D . 1 1

F, en componentes perpendicula-

le llama virar. Supón que el bote

res. La componente importante es

y la vela están como se muestra en

aquella que es paralela a la quilla,

la Figura D.11. La componente K empujará al bote a lo

T

que se etiqueta K, y la otra compo-

largo de una dirección hacia adelante, angulando hacia el

nente es perpendicular a la quilla,

viento. En la posición mostrada, el bote puede navegar más

que se etiqueta T. La componente

F

K

rápido que la rapidez del viento. Esto se debe a que, confor-

K, como se muestra en la Figura

F I G U R A D . 9

me el bote viaja más rápido, el impacto del viento aumenta.

D.9, es la que se encarga del mo-

Esto es similar a correr en una lluvia que viaja en ángulo.

vimiento hacia adelante del bote. La componente T es una

Cuando corres en contra de la dirección en que cae el agua-

fuerza inútil que tiende a inclinar al bote y a moverlo hacia

cero, las gotas te impactan con mayor intensidad y frecuen-

los lados. Esta fuerza componente se compensa con la quilla

cia. Cuando corres en la dirección de caída de la lluvia, las

profunda. De nuevo, la rapidez máxima del bote no puede

gotas no te golpean tan fuerte o con tanta frecuencia. De la

ser mayor que la rapidez del viento.

misma forma, un bote que navega a barlovento experimenta

Muchos botes de vela que navegan en direcciones distin-

una mayor fuerza de impacto del viento, mientras que un

tas a la de sotavento exactamente (Figura D.10) con sus velas

bote que navega a sotavento experimenta una reducción de

orientadas de manera adecuada pueden superar la rapidez

la fuerza de impacto del viento. En cualquier caso, el bote

del viento. En el caso de un bote de vela que corta el viento,

alcanza su rapidez terminal cuando las fuerzas que se opo-

el viento puede seguir impactando

nen cancelan la fuerza producida por el impacto del viento.

con la vela incluso después de que

Las fuerzas opuestas consisten principalmente en la resisten-

el bote supere la rapidez del viento.

V I E N T O

cia del agua contra el casco del bote. Los cascos de los botes

Un surfista, en forma similar, supe-

de carreras se construyen para reducir al mínimo esta fuer -

ra la velocidad de la onda impulsora

za de resistencia, que es el principal freno para adquirir gran-

al angular su tabla de surf a través

des rapideces.

de la ola. Ángulos mayores con res-

Los barcos para navegar sobre hielo (vehículos con vela

pecto al medio impulsor (el viento

K

equipados con rieles que sirven como "quillas" para viajar

para el bote, una ola para la tabla de

T

sobre el hielo) no encuentran resistencia del agua y pueden

F

surf) resultan en mayores rapideces.

viajar a varias veces la rapidez del viento cuando viran a bar-

F I G U R A D . 1 0

lovento. Aunque casi no hay fricción del hielo, un barco

para hielo no acelera sin límites. La velocidad terminal de

estos vehículos está determinada no sólo por fuerzas de fric-

ción opuestas, sino también por el cambio en la dirección

**Puedes hacer un ejercicio sencillo*

A

B

relativa del viento. Cuando la orientación y la rapidez del

para ver que esto es así. Intenta

hacer rebotar una moneda sobre otra

bote son tales que el viento parece cambiar de dirección, de

encima de una superficie lisa, como

F

F

modo que el viento se mueve paralelo a la vela en lugar

se muestra. Observa que la moneda

de hacia ella, cesa la aceleración hacia adelante, al menos en

golpeada se mueve en ángulo recto (perpendicular) al borde de

el caso de una vela plana. En la práctica, las velas son curvas

contacto. Observa también que no hay diferencia si la moneda

y producen un plano aerodinámico que es tan importante

proyectada se mueve a lo largo de la trayectoria A o de la trayectoria B. Consulta con tu instructor para que te dé una explicación más

para los vehículos de vela como para los aviones, como estu-

rigurosa, que incluya la conservación de la cantidad de movimiento.

diaste en el Capítulo 14.

A P É N D I C E E

Crecimiento exponencial

y tiempo de duplicación SCREENCAST: Crecimiento*

exponencial

Una de las cosas más importantes que parece imposible 16 x

percibir es el proceso del crecimiento exponencial. Uno

cree que entiende cómo funciona el interés compuesto, pero

no puede comprender que una fina hoja de papel tisú doblada

sobre sí misma 50 veces (si eso fuera posible) tendría más de

8 x

20 millones de kilómetros de grueso. De lo contrario, uno

podría "ver" por qué el poder de compra sólo es de la mitad de

Cantidad 4 x

lo que era hace un par de décadas, por qué el precio de todo se

2 x

Tiempos de duplicación

ha duplicado en el mismo tiempo y por qué las poblaciones y

x

*los contaminantes proliferan fuera de control.***

Tiempo

Cuando una cantidad como el dinero en el banco, la población o la tasa de consumo de un recurso crece de manera estable a un porcentaje fijo cada año, se dice que el crecimiento es exponencial. Lo importante del crecimiento exponencial es que el tiempo necesario para que la cantidad duplique su tamaño (aumente en 100%) también es constante. Por ejemplo, si la población de una ciudad en crecimiento tarda 12 años en duplicarse de 10,000 a 20,000 habitantes y su crecimiento permanece estable, en los próximos 12 años la población se duplicará a 40,000, y en los próximos 10 años a 80,000, y así sucesivamente.

Hay una importante relación entre la tasa de crecimiento

F I G U R A E . 1

Una curva exponencial. Observa que cada uno de los sucesivos intervalos de tiempo iguales anotados sobre la escala horizontal corresponde a una duplicación de la cantidad indicada sobre la escala vertical. A dicho intervalo se le llama tiempo de duplicación. exponencial es que el tiempo necesario para que la cantidad duplique su tamaño (aumente en 100%) también es constante. Por ejemplo, si la población de una ciudad en ción de energía eléctrica en Estados Unidos significa que crecimiento tarda 12 años en duplicarse de 10,000 a 20,000 en el pasado la capacidad se había duplicado cada 10 años habitantes y su crecimiento permanece estable, en los próxi- [70%/(7%/año) 5 10 años]. Una tasa de crecimiento de 2% mos 12 años la población se duplicará a 40,000, y en los de la población mundial significa que la población del mun- próximos 10 años a 80,000, y así sucesivamente. do se duplica cada 35 años [70%/(2%/año) 5 35 años].

Una comisión de planificación de la ciudad que acepta lo
porcentual y su tiempo de duplicación, el tiempo que tarda
que parece ser una modesta tasa de crecimiento porcentual
en duplicarse una cantidad:†
de 3.5 puede no darse cuenta de que esto significa que la du-
plicación ocurrirá en 70/3.5, o 20 años; esto es el doble de
69.3
Tiempo de duplicación =
la capacidad para cosas como el suministro de agua, plantas
crecimiento porcentual
de tratamiento de aguas negras y otros servicios municipa-
por unidad de tiempo
les cada 20 años.
¿Qué ocurre cuando colocas un crecimiento estable en
≈ 70
un ambiente finito? Piensa en el crecimiento de las bacterias
%
que crecen por división, de modo que una bacteria se con-
De este modo, para estimar el tiempo de duplicación de
vierte en dos, las dos se dividen y se convierten en cuatro,
una cantidad que crece de manera estable, divide el núme-
las cuatro se dividen y se convierten en ocho, y así sucesiva-
ro 70 entre la tasa de crecimiento porcentual. Por ejemplo,
mente. Supón que el tiempo de división

la tasa de crecimiento de 7% de la capacidad de genera-

de una cepa determinada de bacterias

es de 1 minuto. Entonces, esto es un cre-

cimiento estable: el número de bacterias

**Este apéndice está adaptado del material escrito por el profesor*

crece exponencialmente con un tiempo

de física de la University of Colorado, Albert A. Bartlett, quien

afirma: "el mayor defecto de la especie humana es su incapacidad

de duplicación de 1 minuto. Más aún,

para entender la función exponencial". Consulta en Internet más

supón que una bacteria se pone en una

acerca de Al Bartlett.

botella a las 11:00 a.m. y que el creci-

***Consulta K. C. Cole, Sympathetic Vibrations (Nueva York:*

miento continúa de manera estable has-

Morrow, 1984).

†

ta que la botella está llena de bacterias a

Para el decaimiento exponencial se habla de vida media, el tiempo

necesario para que una cantidad se reduzca a la mitad de su valor.

las 12 del mediodía. Piensa seriamente la

Este caso se trata en el Capítulo 33.

siguiente pregunta.

F I G U R A E . 2

719

720

APÉNDICE E

En la Tabla E.2 se ve que cuadruplicar los recursos ex-

P U N T O D E C O N T R O L

tiende la vida del recurso sólo dos tiempos de duplicación.

¿En qué momento la botella se llena a la mitad?

En el ejemplo el recurso es el espacio, pero bien pudiera ser

carbón, petróleo, uranio o cualquier recurso no renovable.

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

TABLA E.2 EFECTOS DEL DESCUBRIMIENTO

A las 11:59 a.m.; ¡las bacterias duplicarán su número cada

DE TRES NUEVAS BOTELLAS

minuto!

Tiempo

Efecto

11:58 a.m.

Botella 1 está 1/4 llena

Es asombroso observar que, 2 minutos antes del medio-

día, la botella estaba sólo ¼ llena. La Tabla E.1 resume la

11:59 a.m.

Botella 1 está 1/2 llena

cantidad de espacio que queda en la botella en los últimos

12:00 mediodía

Botella 1 está llena

minutos antes de mediodía. Si fueras una bacteria promedio

12:01 p.m.

Botellas 1 y 2 están ambas llenas

en la botella, ¿en qué momento te darías cuenta de que te

12:02 p.m.

Botellas 1, 2, 3 y 4 están todas llenas

estás quedando sin espacio? Por ejemplo, ¿sentirías que hay

un serio problema a las 11:55 a.m., cuando la botella está

sólo 3% llena (1/32) y tienes 97% de espacio abierto (sólo

El crecimiento continuo y la duplicación continua con-

anhelando el desarrollo)? El punto aquí es que no hay mu-

ducen a números enormes. En dos tiempos de duplicación,

cho tiempo entre el momento en que los efectos del creci-

una cantidad duplicará dos veces su tamaño (22 5 4; cuá-

miento se vuelven apreciables y el tiempo en que se vuelven

druple); en tres tiempos de duplicación, su tamaño aumen-

abrumadores.

tará ocho veces (23 5 8); en cuatro tiempos de duplicación,

aumentará dieciséis veces (24 5 16); y así sucesivamente.

TABLA E.1 LOS ÚLTIMOS MINUTOS EN LA BOTELLA

Este crecimiento se ilustra mejor con la historia del ma-

Tiempo

Parte llena (%)

Parte vacía

temático de la corte en India quien años atrás inventó el aje-

11:54 a.m.

1/64 (1.6%)

63/64

drez para su rey. El rey estaba tan complacido con el juego,

que ofreció recompensar al matemático, cuya petición pare-

11:55 a.m.

1/32 (3%)

31/32

cía bastante modesta. El matemático solicitó un solo grano

11:56 a.m.

1/16 (6%)

15/16

de trigo en la primera casilla del tablero, dos granos en la

11:57 a.m.

1/8 (12%)

7/8

segunda casilla, cuatro en la tercera casilla, etc., duplican-

11:58 a.m.

1/4 (25%)

3/4

do el número de granos en cada casilla sucesiva hasta usar todas las casillas. A esta tasa habría 263 granos de trigo en

11:59 a.m.

1/2 (50%)

1/2

la casilla 64. El rey pronto vio que no podría satisfacer esta

12:00 mediodía

llena (100%)

ninguna

“modesta” petición, ¡que representaba más trigo del que se había cosechado en toda la historia del planeta Tierra! Supón que a las 11:58 a.m. algunas bacterias previso-ras ven que se están quedando sin espacio y lanzan una

F I G U R A E . 3

búsqueda a gran escala de nuevas botellas. Por fortuna, a

Un solo grano de trigo colocado

las 11:59 a.m. descubren tres nuevas botellas vacías, tres

en la primera casilla del tablero de

veces más espacio de lo que habían conocido. Esto cuadru-

ajedrez se duplica en la segunda

plica el espacio de recursos total jamás conocido para las

casilla, este número se duplica en

bacterias, porque ahora tienen un total de cuatro botellas,

la tercera, y así sucesivamente, pre-

mientras que antes del descubrimiento sólo tenían una.

sumiblemente para las 64 casillas.

Supón ahora que, gracias a su destreza tecnológica, pue-

Observa que cada casilla contiene

den migrar hacia sus nuevos hábitats sin dificultad. Con

un grano más que todas las casillas

seguridad, para la mayoría de las bacterias parecerá que su

anteriores combinadas. ¿Existe

suficiente trigo en el mundo para

problema está resuelto, y justo a tiempo.

llenar las 64 casillas de esta manera?

P U N T O D E C O N T R O L

Es interesante e importante observar que el número de

Si el crecimiento de las bacterias continúa a la tasa

granos en cualquier casilla es un grano más que el total

invariable, ¿qué hora será cuando las tres nuevas

de todos los granos de las casillas anteriores. Esto es cierto

botellas estén llenas a toda su capacidad?

en cualquier parte del tablero. Observa en la Tabla E.3 que,

cuando se colocan ocho granos en la cuarta casilla, el ocho

es uno más que el total de siete granos que ya había en el

C O M P R U E B A T U R E S P U E S T A

tablero. O los 32 granos colocados en la sexta casilla es uno

¡12:02 p.m.!

más que el total de 31 granos que ya había en el tablero. ¡Se

C REC I M I EN TO E X P O N EN C I A L Y T I EM P O DE DU PL I C AC I Ó N

721

TABLA E.3 LLENADO DE LAS CASILLAS

escaso. Esto se muestra en la Figura E.4b. Observa que el

EN EL TABLERO DE AJEDREZ

área bajo la curva es igual al área bajo la curva de la Figu-

ra E.4a. ¿Por qué? Porque el suministro total es el mismo

Número al cuadrado Granos en la casilla

Granos totales hasta aquí

en ambos casos. La principal diferencia es el tiempo que

1

1

1

transcurre hasta que al final se extingue el suministro. La

2

2

3

historia muestra que la tasa de producción de un recurso no

3

4

7

renovable aumenta y desciende en una forma casi simétri-

ca, como se muestra en la Figura E.4c. El tiempo durante

4

8

15

el cual suben las tasas de producción es aproximada men -

5

16

31

te igual al tiempo durante el cual estas tasas descienden a

6

32

63

cero o cerca de cero.

7

64

127

.

.

.

.

.

.

A

.

.

.

B

64

263

264 – 1

no renovable

Consumo de recurso

Tiempo

(a)

(b)

(c)

ve que, en un tiempo de duplicación, se usa más que todo lo

que se ha usado en todos los crecimientos anteriores!

F I G U R A E . 4

De este modo, si se habla de duplicar el consumo de

(a) Si la tasa exponencial de consumo de un recurso no

energía en los siguientes años, ten en mente que esto sig-

renovable continúa hasta que el recurso se agota, el consumo

nifica que en estos años se consumirá más energía de la

desciende de manera abrupta a cero. El área sombreada bajo

esta curva representa el suministro total del recurso. (b) En la

que hasta el momento se haya consumido durante todo

práctica, la tasa de los niveles de consumo se estabiliza y luego

el periodo anterior de crecimiento sostenido. Y si la gene-

desciende menos abruptamente hasta cero. Observa que el área

ración de energía sigue usando de manera predominante

rayada A es igual al área rayada B. ¿Por qué? (c) A tasas más

combustibles fósiles, entonces, excepto por algunas mejo-

bajas de consumo, el mismo recurso dura más tiempo.

ras en la eficiencia, en el siguiente tiempo de duplicación

se quemaría mayor cantidad de carbón, petróleo y gas

natural que el ya consumido por la generación previa de

Las tasas de producción de todos los recursos no renova-

energía, y excepto por mejoras en el control de la contami-

bles disminuyen tarde o temprano. Sólo las tasas de produc-

nación, puedes esperar que se viertan incluso más desechos

ción de los recursos renovables, como la agricultura o los

tóxicos al ambiente que los millones de millones de tonela-
productos forestales, se pueden mantener en niveles estables
das ya vertidos durante todos los años previos de civiliza-
durante periodos prolongados (Figura E.5), siempre y cuan-
ción industrial. ¡También podrías esperar que más calorías
do dicha producción no dependa de la mengua de recursos
de calor producidas por los seres humanos se absorban en
no renovables como el petróleo. Mucha de la agricultura
los ecosistemas de la Tierra de las que se han absorbido
de hoy depende tanto del petróleo que puede decirse que la
en todo el pasado! A la anterior tasa de crecimiento anual
agricultura moderna es simplemente el proceso mediante el
de 7% en la producción de energía, todo esto ocurriría en
cual la tierra se utiliza para convertir petróleo en alimento.
un tiempo de duplicación de una sola década. Si durante
Las repercusiones de la escasez del petróleo no se limi-
los años venideros la tasa de crecimiento anual permanece
tan a racionar la gasolina para los automóviles o el petróleo
a la mitad de este valor, 3.5%, entonces todo esto tendría
para el calentamiento de las casas. Las consecuencias del
lugar en un tiempo de duplicación de dos décadas. ¡Es evi-
crecimiento exponencial no controlado son impactantes.
dente que esto no puede continuar!
El consumo de un recurso no renovable no puede crecer

exponencialmente durante un periodo indefinido, puesto

F I G U R A E . 5

que el recurso es finito y su suministro al final expira. La

Una curva que muestra la tasa de

forma más drástica en que esto podría ocurrir se muestra

consumo de un recurso renova-

en la Figura E.4a, donde la tasa de consumo, como la de

ble como la agricultura o los pro-

barriles de petróleo por año, se grafica contra el tiempo, por

ductos forestales, donde una tasa

decir en años. En tal gráfica el área bajo la curva representa

Consumo

estable de producción y consumo

el suministro del recurso. Se ve que, cuando el suministro

pueden mantenerse durante largo

tiempo siempre y cuando esta

se agota, el consumo cesa por completo. Este cambio sú-

Tiempo

producción no dependa del uso

bito rara vez ocurre debido a que la tasa de extracción del

de un recurso no renovable cuyo

suministro disminuye conforme el recurso se vuelve más

suministro esté disminuyendo.

APÉNDICE E

Es importante preguntar: ¿el crecimiento realmente es
de la ciudad, ¿cuántas plantas de tratamiento de aguas
bueno? Para responder esta pregunta, ten en mente que
negras se necesitarán 42 años después si la ciudad crece
el crecimiento humano está en una fase temprana de vida
de manera estable a 5% anual?
que continúa normalmente a través de la adolescencia. El
crecimiento físico se detiene cuando se alcanza la madurez
5. Si la población anual se duplica en 40 años y la pro-
física. ¿Qué puede decirse del crecimiento que continúa en
ducción mundial de alimentos también se duplica en
el periodo de madurez física? Se dice que tal crecimiento es
40 años, ¿cuántas personas morirán de hambre cada
la obesidad… o peor, un cáncer.
año en comparación con el momento actual?
6. Supón que consigues que un posible empleador acepte
P R E G U N T A S P A R A R E F L E X I O N A R
contratar tus servicios por un salario de un solo cenTa-
1. De acuerdo con un acertijo francés, un lirio acuático
vo el primer día, 2 centavos el segundo día, y duplicar
comienza con una sola hoja. Cada día se duplica el nú-
la cantidad cada día de ahí en adelante, siempre que
mero de hojas, hasta que el estanque está cubierto por

el empleador se mantenga en lo acordado durante un

completo de hojas en el día 30. ¿En cuál día el estanque

mes. ¿Cuál será tu salario total del mes?

está cubierto a la mitad? ¿Cubierto en una cuarta parte?

7. En la pregunta anterior, ¿cuál sería la diferencia

2. Piensa en una economía que tiene una tasa de infla-

entre tu salario de sólo el día 30 y el salario total

ción estable de 3.5% al año. En tal economía, ¿en

de los 29 días anteriores?

cuántos años un dólar pierde la mitad de su valor?

8. Si en la actualidad pudiera utilizarse una planta de

3. Considera una tasa de inflación estable de 3.5%.

fusión, la abundante energía que resultara probable-

A esta tasa, ¿cuál será el precio de un boleto de teatro,

mente sostendría e incluso alentaría aún más el apetito

que ahora cuesta $50, cada 20 años durante los próxi-

actual de crecimiento continuo y en relativamente

mos 60 años? ¿De un abrigo que ahora cuesta $500?

¿De un automóvil que ahora cuesta $50,000? ¿De una

pocos tiempos de duplicación produciría una fracción

casa que ahora cuesta $500,000?

importante de la entrada de energía solar a la Tierra.

Plantea un argumento que demuestre que la demora

4. Si la planta de tratamiento de aguas negras de una

actual en el aprovechamiento de la fusión es una ben-

ciudad apenas es suficiente para la población actual

dición para la especie humana.

Respuestas a problemas

con número impar

Respuestas a Exámenes de práctica de opción múltiple

PARTE UNO

PARTE CINCO

1. A 2. C 3. D 4. C 5. B 6. C 7. A 1. C 2. A 3. B 4. B 5. C 6. B 7. D

8. B 9. A 10. B 11. B 12. A 13. B

8. C 9. C 10. A 11. D 12. D 13. B

14. C 15. B 16. A 17. D 18. B 19. D

14. B 15. B 16. B 17. A 18. D 19. A 20. A 21. A 22. C 23. A 24. B 25. B

20. A 21. D 22. A 23. C 24. A 25. B

26. B 27. A 28. A 29. B 30. A 26. D 27. A 28. A 29. C 30. D

PARTE DOS

PARTE SEIS

1. D 2. B 3. B 4. A 5. A 6. C 7. A 8. C

1. B 2. A 3. B 4. D 5. B 6. C 7. A 9. A 10. D 11. B 12. D 13. A 14. A 8. B 9. D 10. C 11. A 12. C 13. A 15. C 16. B 17. D 18. D 19. A 20. B

14. C 15. D 16. B 17. A 18. A 19. A 20. B 21. C 22. A 23. B 24. A 25. D

PARTE TRES

26. D 27. C 28. D 29. B 30. B

1. C 2. C 3. B 4. C 5. A 6. A 7. A 8. C 9. C 10. C 11. A 12. A 13. B

PARTE SIETE

14. C 15. A 16. C 17. C 18. B 19. C

1. A 2. B 3. A 4. C 5. B 6. D 7. C

20. C 21. B 22. B 23. B 24. A 25. C

8. C 9. B 10. B 11. A 12. A 13. C

26. D 27. D 28. A 29. A 30. B

14. B 15. A 16. B 17. A 18. C 19. D

20. C 21. D 22. A 23. A 24. A 25. A PARTE CUATRO

26. B 27. A 28. A 29. C 30. D

1. B 2. B 3. A 4. D 5. B 6. B 7. A 8. D 9. D 10. C 11. B 12. D 13. D

PARTE OCHO

14. C 15. C 16. C 17. A 18. D 19. B

1. B 2. D 3. B 4. B 5. B 6. B 7. D

20. A 21. D 22. A 23. D 24. B 25. B

8. A 9. A 10. A 11. C 12. C 13. A 26. B 27. D 28. B 29. B 30. B

14. C 15. D 16. B 17. D 18. B

Respuestas a problemas con número impar

Capítulo 1

del suelo, pero sobre todo del aire y el agua. Un experimento consistiría en pesar Preguntas conceptuales

una maceta con tierra y una pequeña semilla, luego pesar la maceta con la planta 1. La ciencia es el producto de la curiosidad humana de saber cómo funciona el después de que ésta haya crecido. El hecho de que la planta crecida pese más es mundo: un cuerpo organizado de conocimiento que describe el orden y las causas evidencia de que la planta está compuesta de más material del que ofrece la tierra.

dentro de la naturaleza y una actividad humana en marcha dedicada a recopilar y Lleva un registro del peso del agua usada para regar la planta y cubre la tierra con organizar el conocimiento acerca del mundo. 3. Alejandría estaba más al norte, plástico para reducir al mínimo las pérdidas por evaporación. Luego, el peso de la a una latitud más alta. 5. Al igual que el Sol, el diámetro de la Luna es 1/110 de planta crecida puede compararse con el peso del agua que absorbe. ¿Cómo puede la distancia entre la Tierra y la Luna. 7. En la época de media Luna, sabía que el estimarse el peso del aire tomado por la planta? 27. Lo que generalmente no se ángulo entre una línea que unía la Luna y la Tierra estaba a 908 con respecto a la entiende es la diferencia entre teoría e hipótesis. En el uso común, una "teoría"

línea que unía a la Luna y el Sol. 9. Las ecuaciones son guías del pensamiento puede significar una suposición o hipótesis, algo que es tentativo o especulativo.

que muestran las conexiones entre los conceptos en la naturaleza. 11. La res-Pero en ciencia, una teoría es una síntesis de un gran cuerpo de información puesta es como se señaló en el Resumen de términos. 13. Una hipótesis cien-validada (por ejemplo, la teoría celular o la teoría cuántica). El valor de una teoría tífica debe ser susceptible de ponerse a prueba. 15. Ve si puedes establecer la es su utilidad (no su "veracidad"). 29. La sombra sería más larga porque en el posición de un antagonista en beneficio del antagonista, y compara qué tan bien planeta más pequeño el ángulo del poste sería mayor con relación a la luz solar. La el antagonista puede establecer tu posición. Si puedes, y tu antagonista no puede, razón entre la sombra y la altura del poste sería mayor que 1 a 8.

la probabilidad es que tú estés correcto en tu posición. 17. No. La ciencia y la Piensa y discute

religión pueden funcionar bien juntas e incluso complementarse entre sí. (Sin 31. Los ejemplos son interminables. El conocimiento de la electricidad, por embargo, los extremistas religiosos pueden afirmar que las dos son incompati-ejemplo, ha demostrado ser en extremo útil. El número de personas que han bles.) 19. La ciencia tiene que ver con recopilar conocimiento y organizarlo; sido lesionadas por la electricidad y que la entienden es mucho menor al número la tecnología le da al conocimiento científico un uso práctico y proporciona los de personas que han sido lesionadas por ella y no la entienden. El temor a la instrumentos que los científicos necesitan para realizar sus investigaciones.

electricidad es mucho más dañino que útil para la salud general y la actitud de Piensa y realiza

las personas.

21. El triángulo que proyecta la imagen sobre la moneda desde el agujero en la Capítulo 2

cartulina es semejante al triángulo más grande que se proyecta hasta el Sol desde Preguntas conceptuales

la cartulina, de modo que el número de monedas y de soles es el mismo. El núme-1. Aristóteles clasificó el movimiento de la Luna como natural. 3. Copérnico ro de soles que cabrían entre la superficie de la Tierra y el Sol es 110.

afirmó que la Tierra da vueltas alrededor del Sol, no del modo contrario. 5. Ga-Piensa y explica

lileo descubrió que un objeto en movimiento continuará en movimiento sin la 23. La sanción por fraude es la excomunión profesional. 25. La hipótesis de necesidad de una fuerza. 7. La ley de Newton es una reafirmación del concepto Aristóteles era parcialmente correcta. El material de la planta proviene en parte de inercia de Galileo. 9. La fuerza neta es de 70 libras a la derecha. 11. La S-1

S-2

RESPUESTAS A PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR

diagonal del paralelogramo representa la resultante del par de vectores.

cosas de seguir haciendo lo que están haciendo en ausencia de una fuerza. De 13. La tensión en cada soga sería de la mitad del peso de Nellie. 15. La fuer-modo que tu amigo debe decir que no se necesita nada para mantener a la Tierra za neta es cero. 17. Todas las fuerzas sobre algo en equilibrio mecánico vec-en movimiento. Es interesante que el Sol impida que la Tierra siga la trayectoria en torialmente suman cero. 21. Sí. La bola que se mueve con rapidez constan-línea recta que seguiría si no actuaran fuerzas, pero no la mantenga en movi-te en línea recta está en equilibrio dinámico. 23. La fuerza de fricción es de miento. Nada lo hace. Éste es el concepto de inercia. 81. La tendencia de la 100 N. 25. El ave todavía se mueve a 30 km/s con respecto al Sol.

bola es permanecer en reposo. Desde un punto de vista fuera del vagón, la bola Piensa y resuelve

permanece en su lugar conforme la parte trasera del vagón se mueve hacia ella.

27. Debido a que cada báscula registra 350 N, el peso total de Lucy es de (Debido a la fricción, la bola puede rodar por la superficie del vagón; sin fricción 700 N. 29. De acuerdo con la regla de equilibrio, $\Sigma F = 0$, las fuerzas ascenden-la superficie se deslizaría bajo la bola.) 83. No. Si no hubiera una fricción que tes son 800 N y las fuerzas descendentes son 500 N + el peso del andamio. De actuara sobre el carro, seguiría en movimiento cuando dejaras de empujar. Pero la modo que el andamio debe pesar 300 N.

fricción actúa, y el carro frena. Esto no viola la ley de la inercia porque de hecho Piensa y clasifica

actúa una fuerza externa. 85. No. Si no hubiera una fuerza que actuara sobre la 31. C, B, A. 33. (a) B, A, C, D; (b) B, A, C, D 35. B, A, C

bola, ésta continuaría en movimiento sin frenar. Pero la resistencia del aire actúa, junto con una ligera fricción con la bolera, y la bola frena. Esto no viola la ley Piensa y explica

de la inercia porque, de hecho, sí hay fuerzas externas que actúan. 87. No. La 37. Aristóteles privilegiaba la lógica filosófica, en tanto que Galileo privilegia-fuerza normal sería la misma ya sea que el libro esté sobre hielo resbaladizo o sobre ba la experimentación. 39. Copérnico y otros de su época pensaban que una papel de lija. La fricción no tiene ninguna función a menos que el libro se deslice fuerza enorme tendría que empujar de manera continua la Tierra para mante-o tienda a deslizarse por la superficie de la mesa. 89. Un cuerpo en movimiento nerla en movimiento. No estaba familiarizado con el concepto de inercia y no tiende a permanecer en movimiento, de modo que tú te mueves con la Tierra en se dio cuenta de que una vez que un cuerpo está en movimiento, no se necesita movimiento ya sea que tus pies estén o no en contacto con ella. Cuando saltas, ninguna fuerza para mantenerlo en movimiento (si supones que no hay fric-tu movimiento horizontal coincide con el de la Tierra y tú viajas con ella. Por ción). 41. Galileo rebatió la noción de que un cuerpo en movimiento necesita tanto, la pared no choca contigo. 91. Si el tren da vuelta a una esquina mientras una fuerza para mantenerlo en movimiento. Demostró que se necesitaba una la

moneda está en el aire, aterrizará al lado tuyo. La moneda continúa en su mo-fuerza para cambiar el movimiento, no para mantener a un cuerpo en movi-vimiento horizontal, en concordancia con la ley de la inercia.

miento, siempre y cuando la fricción fuera despreciable. 43. Nada mantiene a los asteroides en movimiento. La fuerza del Sol desvía sus trayectorias pero no se Capítulo 3

necesita para mantenerlos en movimiento. 45. Si jalas el mantel hacia abajo, Preguntas conceptuales

incluso ligeramente, tenderá a levantar los platos, lo cual impedirá demostrar que 1. Con respecto a la silla, tu rapidez es cero. Con respecto al Sol, es 30 km/s.

los platos permanecen en reposo. Es mejor jalar el mantel en sentido horizontal 3. Un velocímetro registra la rapidez instantánea. 5. El caballo recorre 25 km/h para que los platos permanezcan en reposo. 47. Tu cuerpo tiende a permanecer 0.5 h 12.5 km. 7. Sí. Un automóvil que se mueve con velocidad constante en reposo, en concordancia con la primera ley de Newton. La parte trasera del se mueve con rapidez constante. 9. La aceleración es 10 km/h/s. 11. Tú estás asiento te empuja hacia adelante. Sin soporte en la parte trasera de la cabeza, tu consciente de los cambios en tu rapidez, mas no del movimiento estable. Por tan-cabeza no es empujada hacia adelante junto con tu cuerpo, por lo que es proba-to, estás consciente de la aceleración, mas no de la velocidad constante. 13. Gable que te lesiones el cuello. Por tanto, se recomiendan los reposacabezas. 49.

lileo descubrió que la bola ganaba la misma cantidad de rapidez cada segundo, lo La ley de la inercia se aplica en ambos casos. Cuando el autobús frena, tiendes que indica que la aceleración es constante. 15. Un objeto en caída libre es aquel a seguir en movimiento con la rapidez anterior y te proyectas hacia adelante.

sobre el cual la única fuerza que actúa es la fuerza de la gravedad. Esto significa Cuando el autobús adquiere rapidez, tiendes a seguir en movimiento con la racaer sin ninguna resistencia del aire. 17. La rapidez adquirida en 5 segundos es pidez anterior (más baja) y te proyectas hacia atrás. 51. La suma vectorial de 50 m/s; en 6 segundos, 60 m/s. 19. El objeto en movimiento pierde 10 m/s por las fuerzas es igual a cero. Esto significa que la fuerza neta debe ser cero. 53.

cada segundo que se mueve hacia arriba. 21. La distancia de caída en 1 s es 5 m.

Es correcto decir que los vectores son iguales en magnitud y opuestos en direc-Para una caída de 4 s, la distancia de caída es 80 m. 23. 10 m/s es la rapidez, ción. 55. La tensión será mayor con un pandeo pequeño. Esto se debe a que se 10 m es la distancia y 10 m/s2 es la aceleración.

necesitan vectores grandes en cada lado de la soga que soporta al ave para que la Piensa y realiza

resultante sea igual y opuesta al peso del ave. 57. La fuerza ascendente es 25. Cuéntale a la abuela que, en efecto, la velocidad es qué tan rápido viajas y la la tensión de la liana. La fuerza descendente es la debida a la gravedad. Ambas aceleración es qué tan pronto cambia la rapidez. Por favor, ¡no le digas a la abuela son iguales cuando el mono cuelga en equilibrio. 59. No. Si sólo una fuerza que la velocidad es rapidez! 27. Esto es un seguimiento de la actividad anterior, distinta de cero actúa sobre un objeto, su movimiento cambiará y no estará en

¡una muy buena!

equilibrio mecánico. Tendría que haber otras fuerzas para que el resultado fuera Sustituye y listo

una fuerza neta cero para el equilibrio. 61. Sí. Si el disco se mueve en línea recta con rapidez invariable, las fuerzas de fricción son despreciables. Entonces distancia recorrida d

30 m

29. Rapidez promedio =

= =

= 15 m/s.

la fuerza neta prácticamente es cero y el disco puede considerarse en equilibrio tiempo

t

2 s

dinámico. 63. La báscula registrará la mitad de su peso. De esta

forma, la fuerza cambio de velocidad v 100 k/m

31. Aceleración =

= =

= 10 km/h • s

neta (jalón ascendente de la soga izquierda + jalón ascendente de la soga dere-tiempo

t

10 s

cha – peso) 0. 65. El límite superior que él puede levantar es una carga igual 33. Desde el reposo, distancia 5 ½ at 2 5 ½(5 m/s2)(3 s)2 5 22.5 m.

a su peso. ¡Más allá de eso deja el suelo! 67. La fuerza que evita la aceleración descendente es la fuerza de sostén (normal): la tabla empuja hacia arriba sobre Piensa y resuelve

el libro. 69. Si la fuerza ascendente fuese la única fuerza que actúa, el libro de 35. Debido a que empieza ascendiendo a 30 m/s y pierde 10 m/s cada segundo, hecho se elevaría. Pero otra fuerza, la de la gravedad, hace que el resultado de la su tiempo de subida es de 3 segundos. Su tiempo de regreso también es de 3 se-fuerza neta sea cero. 71. Sólo cuando estás en equilibrio la fuerza de sostén gundos, de modo que está en el aire durante un total de 6 segundos. La distancia sobre ti muestra correctamente tu peso. Entonces es igual a la fuerza de grave -

hacia arriba (o hacia abajo) es ½ gt 2 5 32 45 m. O, a partir de d vt, dad sobre ti. 73. La fricción sobre la caja tiene que ser de 200 N, opuesta a donde velocidad promedio es (30 0)/2 15 m/s, y el tiempo es de 3 segundos, tu jalón de 200 N. 75. La fuerza de sostén sobre la caja disminuye a medida también se obtiene d 15 m/s 3 s 45 m. 37. Con g 10 m/s2, se ve que que la carga contra el suelo disminuye. Cuando la caja está levantada completa -

(v +

inicial

v final) (0 +100)

mente del suelo, la fuerza de sostén del suelo es cero. La fuerza de sostén sobre v gt (10 m/s2)(10 s) 100 m/s; v

=

=

=

prom

50 m/s,

2

2

los pies de los trabajadores aumenta proporcionalmente a medida que la carga hacia abajo. Se puede obtener "cuán lejos" a partir de d = v t = (50 m/s)(10 s) se transfiere del suelo a ellos. Cuando la caja está fuera del suelo y en reposo, su prom

5 500 m o, de manera equivalente, d 5 ½ gt 2 5 5(10)2 5 500 m. (La física es peso se transfiere a los hombres, cuya fuerza normal aumenta en consecuen-amigable… ¡se obtiene la misma distancia usando cualquier fórmula!) 39. A cia. 77. Dos fuerzas deben ser iguales y opuestas para que la fuerza neta 0.

Entonces el paracaidista está en equilibrio dinámico.

partir de d 5 ½ gt 2 5 5 t 2, t = d /5 = (0.6)/5 = 0.35 s. Al duplicar para un

"tiempo de vuelo" produce 0.7 s.

Piensa y discute

79. Tu amigo debe aprender que la inercia no es una clase de fuerza que mantiene Piensa y clasifica

en movimiento a cosas como la Tierra; es el nombre dado a la propiedad de las 41. D, C, A, B 43. (a) B, A 5 C; (b) A, B, C; (c) C, B, A 45. B, A, C

RESPUESTAS A PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR

S-3

Piensa y explica

peso. 11. Una hamburguesa de un cuarto de libra después de cocerse pesa alre-47. Mientras más corto, mejor, de modo que Mo tiene el tiempo de reacción más fa-dedor de 1 newton. 13. La cuerda superior se rompe principalmente por el peso vorable y puede responder más rápido que Jon a las situaciones. 49. La rapidez de de la bola. 15. La aceleración es inversamente proporcional a la masa. 17. No.

impacto es la rapidez relativa: 2 km/h (100 km/h – 98 km/h 2 km/ h). 51. Tu El peso es proporcional a la masa, pero no igual a la masa. 19. La aceleración multa por exceso de velocidad se basa en tu rapidez instantánea: la rapidez regis-disminuye a un tercio. 21. La aceleración y la fuerza neta están en la misma trada en un velocímetro o un radar. 53. Velocidad constante significa no acele-dirección. 23. La razón de la fuerza con respecto a la masa es g. 25. La fuerza ración, de modo que la aceleración de la luz es cero. 55. (a) Sí, debido al cambio neta es 10 N. 27. La rapidez y el área frontal afectan la fuerza de la resistencia de dirección. (b) Sí, debido al cambio de velocidad. 57. No. No puedes decir del aire. 29. Un paracaidista más pesado tiene que caer más rápido para que la cuál automóvil experimenta mayor aceleración a menos que conozcas los tiempos resistencia del aire equilibre el peso.

implicados. 59. El mayor cambio en rapidez ocurre para (30 km/h – 25 km/h Piensa y realiza

5 km/h), que es mayor que (100 km/h – 96 km/h 4 km/h). De modo que,

31. Relata cómo Newton siguió a Galileo, y así sucesivamente. 33. Cuando el para el mismo tiempo, el más lento tiene mayor aceleración. 61. La lectura de papel está encima del libro que cae, sobre el papel no actúa la resistencia del aire su rapidez aumentaría 10 m/s cada segundo. 63. La aceleración de caída libre al porque el libro lo blinda del aire. ¡De modo que papel y libro caen con la misma final del 5º, 10º o cualquier número de segundos es g. Su velocidad tiene diferentes aceleración! 35. ¡El carrete rodará hacia la derecha! Hay un ángulo en el cual no valores en diferentes tiempos, pero, dado que está libre de los efectos de la resis-rodará sino se deslizará. Cualquier ángulo mayor hará que el carrete ruede hacia tencia del aire, su aceleración permanece constante en g. 65. Ya sea hacia arriba o la izquierda. Pero, jalado en sentido horizontal, rueda en la dirección del jalón.

hacia abajo, la tasa de cambio de la rapidez con respecto al tiempo es 10 m/s2, de modo que a cada segundo que sube la rapidez disminuye en 10 m/s. Al bajar, la ra-Sustituye y listo

pidez aumenta en 10 m/s a cada segundo. De este modo, sin resistencia del aire, el 37. Peso 5 (2,000 kg)(10 N/kg) 5 20,000 N. 39. (1 N)(1 kg/10 N) 5 0.1 kg; tiempo para subir es igual al tiempo para bajar. 67. Cuando la resistencia del aire (500 N)

0.25 N

afecta el movimiento, la bola lanzada hacia arriba regresa a su nivel de partida con (0.1 kg)(2.2 lb/1 kg) 5 0.22 lb. 41. a 5 F neta m

/ =

=

(

2,000 kg)

kg

menos rapidez que su rapidez inicial, y también menos rapidez que la bola lanzada 200 N

hacia abajo. De modo que la bola lanzada hacia abajo golpea el suelo con mayor 5 0.25 m/s2. 43. a 5 F neta /m 5

5 5 m/s2.

40 kg

rapidez. 69. La aceleración debida a la gravedad permanece en g constante en todos los puntos a lo largo de su trayectoria en tanto otras fuerzas como la resistencia F neta

15 N

5.0 N

45. a =

=

=

= 5.0 m/s2.

del aire no actúen sobre el proyectil. 71. Si no fuera por el efecto de frenado del m

3.0 kg

kg

aire, ¡las gotas de lluvia golpearían el suelo con la rapidez de balas veloces! 73. La 47. F neta 5 ma 5 (12 kg)(7.0 m/s2) 5 84 kg·m/s2 5 84 N.

resistencia del aire disminuye la rapidez. De modo que una bola lanzada regresará con menos rapidez de la que poseía en un inicio. 75. Conforme el agua cae, Piensa y resuelve

adquiere rapidez. Dado que la misma cantidad de agua sale del grifo cada segundo, 49. La masa de Lillian es (500 N)/(10 N/kg) 5 50 kg. Su peso en libras es se estira conforme la distancia aumenta. Se vuelve más delgada como el caramelo se (50 kg)(2.2 lb/kg) 5 110 lb. 51. Para el jet, a 5 F/ m 5 2(30,000 N)/30,000 kg vuelve más delgado mientras más se estira. Cuando el agua se estira demasiado, 5 2 m/s2. 53. (a) La fuerza sobre el autobús es Ma. Nueva aceleración 5 misma se rompe en forma de gotas. 77. Respuesta abierta.

fuerza/nueva masa 5 Ma/(M 1 M/5) 5 5 Ma/(5 M 1 M) 5 5 Ma/ 6 M 5 (5/6) a.

(b) Nueva aceleración 5 (5/6) a 5 (5/6)(1.2 m/s2) 5 1.0 m/s2.

Piensa y discute

79. Sí. La velocidad y la aceleración no necesitan estar en la misma dirección.

Piensa y clasifica

Un automóvil que se mueve hacia el norte y frena, por ejemplo, acelera hacia el 55. C, B, A 57. (a) C, A, B; (b) B, A, C

sur. 81. La aceleración ocurre cuando cambia la lectura del velocímetro. Si no Piensa y explica

hay cambio, no hay aceleración. 83. Cualquier objeto que se mueve en un círcu-59. Sí. Si la bola frena, actúa una fuerza opuesta a su movimiento, probable-lo o a lo largo de una curva cambia de velocidad (acelera), incluso si su rapidez es mente el arrastre aerodinámico y la fricción entre la bola y la bolera. 61. No.

constante, porque su dirección cambia. Algo con velocidad constante tiene tanto La inercia tiene que ver con la masa, no con el peso. 63. Compra por peso en dirección constante como rapidez constante, de modo que no hay ningún ejemplo Denver, porque la aceleración de la gravedad es menor en Denver que en Death de movimiento con velocidad constante y rapidez variable. 85. Un objeto que Valley. Comprar por masa sería lo mismo en ambas ubicaciones. 65. Cuando se mueve en una trayectoria circular con rapidez constante es un ejemplo simple transportas una carga pesada, hay más masa implicada y una mayor tendencia a de aceleración con rapidez constante porque su velocidad cambia de dirección.

permanecer en movimiento. Si una carga en tu mano se mueve hacia una pared, No puede darse ningún ejemplo del segundo caso porque velocidad constante su tendencia es permanecer en movimiento cuando haga contacto. Esto tiende a significa aceleración cero. No puedes tener aceleración distinta de cero mientras apachurrar tu mano si está entre la carga y la pared, un ejemplo desafortunado de tienes velocidad constante. No hay ningún ejemplo de cosas que aceleren mien-la primera ley de Newton en acción. 67. Un cuchillo de carnicero masivo es más tras no aceleran. 87. La aceleración de un objeto está en una dirección opuesta a efectivo porque su masa más grande contribuye a una mayor tendencia a seguir en su velocidad cuando su velocidad disminuye, por ejemplo, una bola que sube o un movimiento conforme el cuchillo corta el alimento. 69. Diez kilogramos pesan automóvil que frena hasta detenerse. 89. La que está en medio. Dicha bola gana unos 100 N en la Tierra (peso 5 mg 5 10 kg 10 m/s2 5 100 N, o 98 N si se rapidez más rápido al principio, donde la pendiente es más pronunciada, de modo usa g 5 9.8 m/s2). En la Luna el peso es 1/6 de 100 N 5 16.7 N (o 16 N si se usa que su rapidez promedio es mayor aun cuando tenga menos aceleración en la úl-g 5 9.8 m/s2). La masa es 10 kg en todas partes. 71. El cambio de peso es tima parte de su viaje. 91. Si la resistencia del aire no es un factor, la aceleración el cambio de masa por g, de modo que, cuando cambia la masa por 2 kg, el peso de un objeto son los mismos 10 m/s2 sin importar su velocidad inicial. Si se lanza cambia en alrededor de 20 N. 73. 1 kg de masa pesa 10 N, de modo que hacia abajo, su velocidad será mayor, pero no su aceleración. 93. Cuando la 30 kg pesan 300 N. La bolsa puede contener con

seguridad 30 kg de manzanas, aceleración del automóvil está en una dirección opuesta a su velocidad, el autosi no la levantas muy rápido. 75. La segunda ley enuncia la relación entre fuerza móvil "desacelera", frena. 95. La bola en B termina primero porque su rapidez y aceleración. Si no hay fuerza neta, no hay aceleración, que es lo que la primera promedio a lo largo de la parte inferior, así como las pendientes hacia abajo y hacia ley de Newton señala. De modo que la primera ley de Newton es congruente con arriba, es mayor que la rapidez promedio de la bola a lo largo de la pista A. 97. La la segunda ley y puede considerarse un caso especial de la segunda ley. 77. De rapidez resultante de hecho es de 5 m/s. La resultante de cualquier par de vectores acuerdo. La aceleración (frenar el automóvil) es opuesta a la velocidad (la direc-de 3 y 4 unidades en ángulo recto mutuo es de 5 unidades. Esto se confirma ción en que se mueve el automóvil). 79. Levantar al oponente disminuye la con el teorema de Pitágoras: a 2 b 2 c 2 produce 32 42 52. 99. De nuevo, fuerza con la cual el suelo lo soporta a él y, en correspondencia, disminuye de acuerdo con el teorema de Pitágoras, a 2 b 2 c 2 produce 1202 902 1502.

la fuerza de fricción que puede reunir. La fricción reducida limita la efectividad del De modo que la rapidez en tierra es de 150 km/h.

oponente. 81. (a) No. La resistencia del aire también actúa. Caída libre significa libre de todas las fuerzas distintas de la de la gravedad. Un objeto que cae pue-Capítulo 4

de experimentar resistencia del aire; un objeto en caída libre sólo experimenta la Preguntas conceptuales

fuerza debida a la gravedad. (b) Sí. Aunque no se acerca más a la Tierra, el satélite 1. La aceleración y la fuerza neta son proporcionales entre sí, no iguales. 3. Sí. A está cayendo (más sobre esto en el Capítulo 10). 83. La única fuerza sobre una medida que aumentas tu empuje, la fricción también aumenta en la misma pro-moneda lanzada, excepto por la resistencia del aire, es mg. De modo que el mismo porción. 5. La fricción estática es mayor que la resistencia al deslizamiento para mg actúa sobre ella en todos los puntos de su trayectoria. 85. Explicas la diferen-el mismo objeto. 7. Sí. La fricción de los fluidos varía con la rapidez. 9. masa; cia entre una fuerza aplicada y una fuerza neta. Sería correcto decir que sobre un

automóvil en reposo no actúa ninguna fuerza neta. 87. Cuando la manzana se helicóptero consigue su fuerza de sustentación al empujar el aire hacia abajo, en sostiene en reposo, la fuerza de sostén ascendente es igual a la fuerza gravitacional cuyo caso la reacción es el aire que empuja al helicóptero hacia arriba. 15. El sobre la manzana y la fuerza neta es cero. Cuando la manzana se suelta, la fuerza proceso para determinar los componentes de un vector. 17. La fuerza de fric-de sostén ascendente ya no está ahí y la fuerza neta es la fuerza gravitacional, 1 N.

ción tiene la misma magnitud, y la suma de todas las fuerzas es cero. 19. inercia; (Si la manzana cae suficientemente rápido como para que la resistencia del aire sea aceleración; acción; reacción.

importante, entonces la fuerza neta será menos que 1 N y con el tiempo puede llegar a cero si la resistencia del aire se acumula hasta 1 N.) 89. Ambas fuerzas Piensa y realiza

tienen la misma magnitud. Esto es más fácil de entender si visualizas al paracai-21. Tu mano será empujada hacia arriba, una reacción del aire que se desvía hacia dista en reposo en una fuerte corriente ascendente de aire: equilibrio estático.

abajo.

Ya sea equilibrio estático o dinámico, la fuerza neta es cero. 91. Cuando una Sustituye y listo

paracaidista abre su paracaídas, ella frena. Esto significa que acelera hacia arri-23. 100 km/h 2 75 km/h 5 25 km/h hacia el norte. 100 km/h 1 75 km/h 5

ba. 93. Justo antes de que un cuerpo en caída alcance una velocidad terminal, 175 km/h hacia el norte. 25. R = 42 + 32 = 5.

todavía hay una aceleración descendente, porque la fuerza gravitacional todavía es mayor que la resistencia del aire. Cuando la resistencia del aire se acumula para Piensa y resuelve

igualar la fuerza gravitacional, se alcanza una velocidad terminal. Entonces la re-27. (a) a 5 D v/ D t 5(25 m/s)/(0.05 s) 5 500 m/s2. (b) F 5 ma 5 (0.003 kg)(500 m/s2) sistencia del aire es igual y opuesta a la fuerza gravitacional. 95. La esfera estará 5 1.5 N, que es aproximadamente ⅓ de libra. (c) Por la tercera ley de Newton, la

en equilibrio cuando alcance rapidez terminal, lo que ocurre cuando la fuerza misma cantidad, 1.5 N. 29. a 5 F/ m, donde F = (3.0 N)2 + (4.0 N)2 = 5 N.

gravitacional sobre ella se equilibra con una fuerza igual y opuesta de arrastre del De modo que a 5 F/ m 5 5 N/2.0 kg 5 2.5 m/s2.

fluido. 97. La pelota de tenis más pesada golpeará el suelo primero por la misma razón que el paracaidista más pesado de la Figura 4.15 golpea el suelo primero.

Piensa y clasifica

Observa que, aunque la resistencia del aire sobre la pelota más pesada es más pe-31. A 5 B 5 C 33. (a) A 5 B 5 C; (b) C, B, A

queña con relación al peso de la pelota, en realidad es más grande que la resistencia Piensa y explica

del aire que actúa sobre la otra pelota. ¿Por qué? Porque la pelota más pesada cae 35. En concordancia con la tercera ley de Newton, Steve y Gretchen se tocan más rápido y la resistencia del aire es más grande a mayor rapidez. 99. La bola mutuamente. Uno de ellos puede iniciar el contacto, pero la interacción física no sube en menos tiempo del que cae. Si exageras la circunstancia y consideras el puede ocurrir sin contacto entre Steve y Gretchen. De hecho, ¡no puedes tocar ejemplo de la pluma del ejercicio 98, el tiempo para que la pluma ondee desde su sin ser tocado! 37. (a) Actúan dos pares de fuerzas: el jalón de la Tierra sobre la máxima altitud evidentemente es más largo que el tiempo que tarda en alcanzar manzana (acción) y el jalón de la manzana sobre la Tierra (reacción); y la mano dicha altitud. Lo mismo sucede en el caso no tan evidente de la bola.

empuja la manzana hacia arriba (acción) y la manzana empuja la mano hacia aba-Piensa y discute

jo (reacción). (b) Sin arrastre aerodinámico, actúa un par de fuerzas: el jalón de la 101. Sí, como lo ilustra una bola lanzada al aire en sentido vertical. En un inicio Tierra sobre la manzana y el jalón de la manzana sobre la Tierra. 39. (a) Mien-su velocidad es hacia arriba y al final es hacia abajo, todo ello mientras acelera tras el bate está en contacto con la bola hay dos interacciones, una con el bate e, con una g constante descendente. 103. No. Un objeto puede moverse en una incluso entonces, con la gravedad de la Tierra. Acción: el bate golpea a la bola; curva sólo cuando actúa una fuerza. Sin fuerza, su trayectoria sería una línea rec-reacción: la

bola golpea al bate. Y, acción: la Tierra jala hacia abajo sobre la bola ta. 105. Una persona a dieta busca perder masa. Es interesante que una persona (peso); reacción: la bola jala hacia arriba sobre la Tierra. (b) Mientras la bola está pueda perder peso con sólo alejarse más del centro de la Tierra, en la cima de una en vuelo, las principales interacciones son con la gravedad de la Tierra y con el montaña, por ejemplo. 107. Observa que 30 N jalan tres bloques. Para jalar aire. Acción: la Tierra jala hacia abajo sobre la bola (peso); reacción: la bola jala dos bloques, entonces se necesita un jalón de 20 N, que es la tensión de la soga hacia arriba sobre la Tierra. Y, acción: el aire empuja a la bola; reacción: la bola entre el segundo y el tercer bloque. En consecuencia, la tensión de la soga que jala empuja al aire. 41. Cuando la bola ejerce una fuerza sobre el suelo, el suelo sólo al tercer bloque es 10 N. (Observa que la fuerza neta sobre el primer bloque, ejerce una fuerza igual y opuesta sobre la bola, por lo tanto rebota. La fuerza del 30 N – 20 N 5 10 N, es la fuerza necesaria para acelerar dicho bloque, que tiene un suelo sobre la bola proporciona el rebote. 43. La fricción sobre la caja es de tercio de la masa total.) 109. Cuando te detienes en forma súbita, tu velocidad 200 N, los cuales cancelan tu empuje de 200 N sobre la caja para producir la cambia rápidamente, lo cual significa una gran aceleración de detención. Por la fuerza neta cero que explica la velocidad constante (aceleración cero). No, aunque segunda ley de Newton, esto significa que la fuerza que actúa sobre ti también es la fuerza de fricción sea igual y con dirección opuesta a la fuerza aplicada, las dos grande. Experimentar una gran fuerza es lo que te lesiona. 111. La fuerza que no constituyen un par de fuerzas acción-reacción. Eso se debe a que ambas fuerzas ejerces sobre el suelo es mayor. El suelo debe empujar sobre ti con una fuerza actúan sobre el mismo objeto: la caja. La reacción a tu empuje sobre la caja es el mayor que la fuerza descendente de la gravedad para producir una fuerza neta empuje de la caja de vuelta sobre ti. La reacción a la fuerza de fricción del suelo resultante que sea ascendente y que te acelere hacia arriba. 113. En el caso de sobre la caja es la fuerza de fricción opuesta de la caja sobre el suelo. 45. Las una aceleración decreciente, el aumento de rapidez se vuelve más pequeño cada fuerzas deben ser iguales y opuestas porque son las únicas fuerzas que actúan segundo, no obstante, en cada segundo hay una mayor rapidez que en el segundo sobre la persona, quien obviamente no acelera. Sin embargo, observa que el par precedente. 115. La fuerza neta es 10 N – 2 N 5 8 N (o, más precisamente, de fuerzas no constituyen un par acción-reacción porque actúan sobre el mismo 9.8 N – 2 N 5 7.8 N). 117. Una hoja de papel presenta un área superficial más cuerpo. La fuerza descendente, el peso del hombre, la

Tierra jala hacia abajo sobre grande al aire mientras cae (a menos que caiga de canto) y, por tanto, tiene menor el hombre, tiene la reacción el hombre jala hacia arriba a la Tierra, no el suelo em- rapidez terminal. Una hoja de papel arrugado presenta un área más pequeña y, en puja sobre él. Y la fuerza ascendente del suelo sobre el hombre tiene la reacción del consecuencia, cae más rápido antes de alcanzar su rapidez terminal. 119. Para hombre contra el suelo, no la interacción entre el hombre y la Tierra. (Si esto te rapideces bajas, las aceleraciones son casi iguales porque el arrastre aerodinámico parece confuso, puedes encontrar consuelo en el hecho de que el mismo Newton es pequeño con relación a los pesos de los objetos que caen. Desde una mayor tenía problemas para aplicar su tercera ley a ciertas situaciones. Aplica la regla, A altura, hay tiempo para que el arrastre aerodinámico se acumule y muestre sus sobre B reacciona a B sobre A, como en la Figura 5.7.) 47. Cuando el escalador efectos de manera más notoria. 121. En ninguna parte su velocidad es hacia jala la soga hacia abajo, la soga jala simultáneamente al escalador hacia arriba, arriba. La fuerza neta ascendente sobre Nellie durante el corto tiempo que el en la dirección que desea el escalador. 49. No. El hombre fuerte puede ejercer arrastre aerodinámico supera la fuerza de gravedad produce una momentánea sólo fuerzas iguales sobre ambos vagones, tal como tu empuje contra una pared fuerza neta ascendente y aceleración ascendente. Esto produce una disminución en iguala al empuje de la pared sobre ti. Lo mismo sucede con dos paredes o dos su rapidez descendente que, no obstante, todavía es descendente.

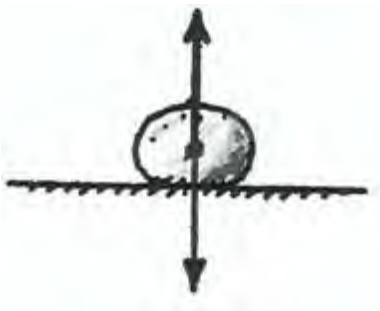
vagones. Dado que sus masas son iguales, experimentarán aceleraciones iguales y se moverán igualmente. 51. En concordancia con la tercera ley de Newton, Capítulo 5

la fuerza sobre cada uno es de la misma magnitud. Pero el efecto de la fuerza (la Preguntas conceptuales

aceleración) es diferente para cada uno debido a las distintas masas. El más masivo 1. La fuerza es la de la pared que empuja sobre tus dedos. 3. Para una inte -

camión Mack experimenta menos cambio de movimiento que el Civic. 53. El r acción se necesita un par de fuerzas. 5. Acción: bate contra pelota. Reacción: equipo ganador empuja más fuerte contra el suelo. Entonces el suelo empuja más bola contra bate. 7. No. El par de fuerzas es interno al sistema manzana-na-fuerte sobre ellos, lo que produce una fuerza neta a su favor. 55. No. La fuerza ranja. 9. Sí. La fuerza neta la proporciona el contacto con tu pie. Si dos fuer-

sobre la soga es cero, lo cual significa que la tensión es la misma en ambos extrezas opuestas e iguales actúan sobre el balón, la fuerza neta sobre él es cero y no mos, en concordancia con la tercera ley de Newton. 57. Parece que el escritor acelerará. 11. Las diferentes aceleraciones se deben a distintas masas. 13. Un no sabía que la reacción a los gases de escape no depende de un medio para los



RESPUESTAS A PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR

gases. Una pistola, por ejemplo, retrocederá si se dispara en un vacío. De hecho, rial. 17. El vagón B tiene la rapidez del vagón A antes de la colisión. 19. Dado en un vacío no hay arrastre

aerodinámico y una bala o cohete funcionan incluso que son vectores con la misma magnitud en ángulos rectos entre sí, la cantidad de mejor. 59. Ascender significa jalar el cable hacia abajo, lo que mueve el globo movimiento combinada es 2 kg • m/s.

hacia abajo conforme la persona asciende. 61. (a) El otro vector es hacia arriba, Piensa y realiza

como se muestra. (b) Se llama fuerza normal.

21. Respuesta abierta.

Sustituye y listo

23. p 5 mv 5 (50 kg)(4 m/s) 5 200 kgm/s. 25. I 5 (10 N)(5 s) 5

50 Ns. 27. I 5 D mv = (50 kg)(4 m/s) 5 200 kgm/s 5 200 Ns.

Piensa y resuelve

29. La bola de boliche tiene una cantidad de movimiento de (10 kg) (6 m/s) 5

60 kgm/s, que tiene la magnitud del impulso para detenerla. Esto es 60 Ns.

mv

(Observa las unidades Ns 5 kgm/s.) 31. A partir de Ft 5 D mv, Ft =

5

63. (a) Vectores como se muestran. (b) La fuerza de tensión ascendente es mayor, t

lo que resulta en una fuerza neta ascendente.

[(75 kg)(25 m/s)]/0.1 s 5 18,750 N. 33. La cantidad de movimiento después de la colisión es cero, lo cual significa que la cantidad de movimiento antes de la colisión debió ser cero. La bola de 1 kg debe moverse el doble de rápido que la bola de 2 kg de modo que las magnitudes de sus cantidades de movimiento sean iguales.

35. Cantidad de movimiento cantidad de movimiento

antes

después

(5 kg)(1 m/s) 1 (1 kg) v 5 0

5 m/s 1 v 5 0

v 5 25 m/s

De modo que, si el pez pequeño se aproxima al pez grande a 5 m/s, la cantidad de movimiento después del almuerzo es cero.

65. La aceleración de la piedra en lo alto de su trayectoria, o en cualquier parte 37. En ambos casos puede aplicarse la conservación de la cantidad de movimien-donde la fuerza neta sobre la piedra sea mg, es g, hacia abajo. 67. (a) Las fuerzas to. (a) Para el movimiento frontal, la cantidad de movimiento total es cero, de vectoriales como se muestran. (b) Observa que la resultante de las dos fuer-modo que los restos después de la colisión no tienen movimiento. (b) Como se zas normales es igual y opuesta al peso de la piedra.

muestra en la Figura 6.18, la cantidad de movimiento total se dirige hacia el noreste, la resultante de dos vectores perpendiculares, cada uno con una magnitud de 20,000 kg·m/s. Tiene una magnitud de 28,200 kg·m/s. La rapidez de los restos es esta cantidad de movimiento dividida entre la masa total, v (28,200 kg·m/s)/

(2,000 kg) 14 m/s.

Piensa y clasifica

39. (a) B, D, C, A; (b) B, D, C, A 41. (a) A, B, C; (b) A, B, C; (c) C, B, A; (d) A, B, C

Piensa y explica

69. Las magnitudes de mg y S serán iguales. 71. Ninguna fuerza actúa en sen-43. La cantidad de movimiento de un supertanque es enorme, lo cual significa tido horizontal sobre la bola, de modo que la velocidad horizontal inicial perma-que se necesitan impulsos enormes para cambiar su movimiento, que se produ-nece constante conforme la bola se mueve a través del aire en concordancia con la cen al aplicar fuerzas modestas durante largos periodos. Debido a la fuerza de la primera ley de inercia de Newton.

resistencia del agua, el supertanque debe desplazarse 25 km para reducir suficien-Piensa y discute

temente la cantidad de movimiento. 45. Las bolsas de aire prolongan el tiempo 73. La respuesta está dada en la ecuación a = F/ m. Conforme el combustible se de impacto, lo que en consecuencia reduce la fuerza de impacto. 47. Las sogas quema, la masa del cohete se vuelve menor. Conforme m disminuye mientras F

que se estiran prolongan el tiempo durante el cual disminuye la cantidad de mo-permanece igual, ¡ a aumenta! A medida que el combustible se quema hay menos vimiento, lo que en consecuencia reduce la fuerza de sacudida de la soga. Observa masa que acelerar. 75. Sí, es cierto. La Tierra no puede jalarte hacia abajo sin que detener a una persona más suavemente no reduce el impulso; reduce sólo la que tú simultáneamente jales a la Tierra hacia arriba. La aceleración de la Tierra fuerza. 49. Doblar las rodillas te da más tiempo para que disminuya la cantidad es despreciablemente pequeña y no se percibe debido a la enorme masa de la de movimiento, lo que en consecuencia reduce la fuerza de aterrizaje. 51. Una Tierra. 77. Sí. Una pelota de béisbol ejerce una fuerza externa sobre el bate, mano extendida te da más tiempo para que disminuya la cantidad de movimiento opuesta al movimiento del mismo. Esta fuerza externa desacelera el bate que vie-de la bola hasta cero, lo que resulta en una menor fuerza de impacto sobre tu ne en dirección contraria. 79. Las fuerzas no se cancelan porque actúan sobre mano. 53. El arrugamiento da más tiempo para que disminuya la cantidad de diferentes cosas: una actúa sobre el caballo y la otra actúa sobre el vagón. Es cierto movimiento del automóvil, lo que resulta en una menor fuerza de impacto sobre que el vagón jala de vuelta sobre el caballo y que esto impide que el caballo corra los ocupantes. 55. Su cantidad de movimiento es la misma (su peso puede cam-tan rápido como podría hacerlo sin el vagón enganchado. Pero la fuerza que actúa biar, mas no su masa). 57. La gran cantidad de movimiento del agua que brota sobre el vagón (el jalón del caballo menos la fricción) dividida entre la masa del produce un retroceso que hace que la manguera sea difícil de sostener, tal como vagón produce la aceleración del vagón. Para acelerar, el caballo tiene que empujar una escopeta es difícil de sostener cuando dispara perdigones. 59. Impulso es contra el suelo con más fuerza de la que ejerce sobre el vagón y el vagón ejerce fuerza tiempo. Las fuerzas son iguales y opuestas, por la tercera ley de Newton, sobre él. Así que debes decirle al caballo que empuje hacia atrás sobre el suelo.

y los tiempos son iguales, de modo que los impulsos son iguales y opuestos.

61. La cantidad de movimiento de la manzana que cae se transfiere hacia la Tie-Capítulo 6

rra. Es interesante que cuando la manzana se suelta, la Tierra y la manzana se Preguntas conceptuales

mueven una hacia la otra con cantidades de movimiento iguales y opuestas. De-1. La patineta en movimiento tiene mayor cantidad de movimiento sólo porque bido a la enorme masa de la Tierra, su movimiento es imperceptible. Cuando la se está moviendo. 3. El impulso puede aumentar al incrementarse la fuerza o manzana y la Tierra se golpean entre sí, sus cantidades de movimiento llegan a al aumentar el tiempo de aplicación. 5. La relación entre el impulso y la can-cancelarse: cero, el mismo valor que antes. 63. Los guantes más ligeros tienen tidad de movimiento se deriva de la segunda ley de Newton. 7. Menos fuerza menos acolchonamiento y menos capacidad para prolongar el tiempo de impacto.

ocurre si la cantidad de movimiento disminuye durante un largo tiempo. 9. Si Por tanto, resultan en mayores fuerzas de impacto para un golpe dado. 65. La ruedas con el golpe, el impacto tiene lugar durante un tiempo largo, lo cual sig-nube de insectos voladores puede tener una cantidad de movimiento neta igual a nifica un golpe con menos fuerza. 11. La opción (c) necesita el impulso más cero si permanece en la misma posición; entonces las cantidades de movimiento grande. 13. Sí; el enunciado es correcto. 15. La cantidad de movimiento no de los innumerables insectos se cancelan y no hay una cantidad de movimien-se conservaría si la fuerza, y por tanto el impulso, no fuera una cantidad vecto-to neta en ninguna dirección dada. 67. No. Si no se imparte ninguna cantidad

de movimiento a la bola, no se impartirá ninguna cantidad de movimiento con de movimiento sólo se conserva en los sistemas que no están sujetos a fuerzas dirección opuesta sobre el lanzador. Realizar los movimientos de lanzamiento no externas. 95. Si el aire se detiene gracias a la vela, entonces el impulso contra la tiene ningún efecto neto. Si al comienzo del lanzamiento comienzas a retroceder, vela es igual y opuesto al impulso sobre el ventilador. No

hay impulso neto y no al final del lanzamiento cuando detienes el movimiento de tu brazo y sostienes hay cambio en la cantidad de movimiento. El bote permanecerá sin movimiento.

la bola, también dejas de moverte. Tu posición puede cambiar un poco, pero ter-

¡Rebotar cuenta! 97. Las balas que rebotan en la placa de acero ejercen mayor minas en reposo. No darle una cantidad de movimiento a la bola significa que tú impulso. La placa se mueve más por las balas que rebotan que por las balas que no ganas ninguna cantidad de movimiento de retroceso. 69. Los dos carros que se quedan pegadas. 99. De acuerdo con el primer amigo porque, después de la retroceden tienen la misma cantidad de movimiento. De modo que el carro con colisión, la bola de boliche tendrá mayor cantidad de movimiento que la bola de el doble de masa tiene la mitad de la rapidez que el carro menos masivo; esto es, golf. Observa que antes de la colisión, toda la cantidad de movimiento del siste-2 m(v/2) mv. 71. La cantidad de movimiento no se conserva para la bola en sí ma compuesto por las dos bolas se encuentra en la bola de golf en movimiento.

porque sobre ella se ejerce un impulso (fuerza gravitacional tiempo), de modo Llama a esto 1 unidad. Entonces, después de la colisión, la cantidad de movi-que la bola gana cantidad de movimiento. Sólo en ausencia de una fuerza externa miento de la bola de golf que rebota es casi 1 unidad. La cantidad de mo-la cantidad de movimiento no cambia. Si toda la Tierra y la bola que rueda se vimiento (¡no la rapidez!) de la bola de boliche tendrá que ser de casi 2 unidades.

toman en conjunto como un sistema, entonces la interacción gravitacional entre

¿Por qué? Porque sólo entonces su cantidad de movimiento se conserva. La can-la Tierra y la bola son fuerzas internas y no actúa un impulso externo. Entonces el tidad de movimiento antes es 1 unidad; la cantidad de movimiento después es cambio en la cantidad de movimiento de la bola se acompaña de un cambio igual (2 1) 1. 101. El impulso es mayor para la reflexión, que en efecto es un y opuesto de cantidad de movimiento de la Tierra, lo que resulta en un cambio rebote. Entonces, las paletas rebotan más en las regiones plateadas. Las paletas nulo en la cantidad de movimiento. 73. Para el sistema en el que está sólo la en el dibujo giran en sentido de las manecillas del reloj, vistas desde arriba. (Esta bola, la cantidad de movimiento cambia y, por tanto, no se conserva. Pero para el

rotación es sustituida por una rotación contraria cuando hay aire presente, que es sistema más grande de bola + Tierra, la cantidad de movimiento se conserva por-el caso para la mayoría de los radiómetros. La superficie negra absorbe radiación y que los impulsos que actúan son impulsos internos. El cambio en la cantidad de se calienta, lo que calienta el aire circundante. La superficie se aleja del aire calien-movimiento de la bola es igual y opuesto al cambio en la cantidad de movimiento te, lo que resulta en un retroceso que hace girar las paletas en sentido contrario a de la Tierra que retrocede. 75. Si el sistema se compone de la piedra sola, su las manecillas del reloj.) 103. Si una no golpea recto, entonces la bola blanco se cantidad de movimiento indudablemente cambia cuando cae. Si el sistema se aleja en ángulo (por decir, hacia la izquierda) y tiene una componente de cantidad agranda e incluye la piedra + la Tierra, entonces la cantidad de movimiento desde movimiento perpendicular a la cantidad de movimiento inicial de la bola. Para cendente de la piedra se cancela con la cantidad de movimiento igual pero opues-compensar esto, la bola que golpea no puede simplemente llegar al reposo, sino ta de la Tierra que "corre" para encontrar a la piedra. 77. Por la tercera ley de que debe alejarse en la otra dirección (por decir, hacia la derecha). Hará esto en tal Newton, la fuerza sobre el bicho es igual en magnitud y opuesta en dirección a la forma que su componente lateral de cantidad de movimiento sea igual y opuesto fuerza sobre el parabrisas del automóvil. El resto es lógica: dado que el tiempo de al de la bola blanco. Esto significa que la cantidad de movimiento lateral total es impacto es el mismo para ambos, la cantidad de impulso es la misma para ambos, cero, como era antes de la colisión. (Examina la Figura 6.19 y ve cómo los com-lo cual significa que ambos experimentan el mismo cambio en cantidad de movi-ponentes laterales de la cantidad de movimiento se cancelan.)

miento. El cambio en la cantidad de movimiento del bicho es evidente debido a Capítulo 7

su gran cambio en rapidez. El mismo cambio en la cantidad de movimiento del Preguntas conceptuales

automóvil mucho más masivo no es evidente porque el cambio en rapidez es muy 1. La energía es más evidente cuando está cambiando. 3. No se realiza nin-pequeño. No obstante, ¡la magnitud de m V para el bicho es igual a M v para el gún trabajo cuando se empuja sobre una pared estacionaria, como en la Figura automóvil! 79. La magnitud de fuerza, impulso y cambio en cantidad de movi-7.4. 5. La energía permite que un objeto realice trabajo. 7.

Tendría el doble miento es la misma para cada uno. El Mini Cooper experimenta una mayor desde EP porque la distancia es dos veces mayor. 9. La EP es significativa cuando aceleración porque su masa es menor. 81. La dirección de la cantidad de movi -

cambia, realiza trabajo o se transforma en energía de otra forma. 11. Los frenos miento es hacia la izquierda porque la cantidad de movimiento del carro deben proporcionar cuatro veces más trabajo. Hay cuatro veces más distancia de 0.8 kg es mayor. Considerando la magnitud, la cantidad de movimiento de frenado (como 22 4). 13. La rapidez tiene poco o ningún efecto sobre neta (0.5)(1) 2 (0.8) (1.2) 20.46. 83. Se viola la conservación de la can-la fricción. 15. Inmediatamente antes de que la manzana golpee el suelo, su tidad de movimiento. La cantidad de movimiento del bote antes de que el héroe EP inicial se convierte en EC. Cuando golpea el suelo su energía se convierte aterrice sobre él será la misma que la cantidad de movimiento de bote + héroe desen energía térmica. 17. Energía reciclada es la reutilización de la energía que pués. El bote frenará. Si, por ejemplo, las masas del héroe y el bote fuesen iguales, el de otro modo se desperdiciaría. 19. Conforme la fuerza aumenta, la distancia bote debería frenarse a la mitad de la rapidez: mv 2 m(v/2)

. En términos

antes

después

disminuye por el mismo factor. 21. La eficiencia es de 100%. 23. El Sol es de impulso-cantidad de movimiento, cuando el héroe hace contacto con el bote, se la fuente de estas energías. 25. No. Al igual que la electricidad, el hidrógeno mueve junto con el bote por una fuerza de fricción entre sus pies y la superficie del es un portador de energía, no una fuente. Por ello se necesita energía para separar bote. La fuerza de fricción igual y opuesta sobre la superficie del bote proporciona el hidrógeno de las moléculas.

el impulso que frena el bote. (Aquí sólo se consideran fuerzas horizontales y el componente horizontal de la cantidad de movimiento.) 85. El impulso será ma-Piensa y realiza

yor si la mano rebota porque hay un cambio mayor en la cantidad de movimiento 27. Parte de la energía del balón de básquetbol se transfiere a la pelota de tenis de la mano y el brazo, acompañados

de un impulso más grande. La fuerza ejercida por compresión. Durante la descompresión, el balón de básquetbol empuja la sobre los ladrillos es igual y opuesta a la fuerza de los ladrillos sobre la mano. Por pelota de tenis hacia arriba, mientras que la pelota de tenis empuja al balón de fortuna, la mano es resistente y está endurecida por la práctica prolongada.

básquetbol hacia abajo. De modo que la EP del balón de básquetbol rebotado es menor y la EP de la pelota de tenis es mayor, pero ambas se suman para igualar las Piensa y discute

EP originales de las pelotas antes de soltarlas.

87. Cuando un boxeador golpea a su oponente, el oponente contribuye al impulso que cambia la cantidad de movimiento del golpe. Cuando el golpe falla, Sustituye y listo

el oponente no suministra impulso: todo el esfuerzo se va en reducir la canti-29. W 5 Fd 5 (2.0 N)(1.2 m) 5 2.4 Nm 5 2.4 J. 31. W 5 Fd 5

dad de movimiento de los golpes que suministra el boxeador en sí. Esto cansa (500 N)(2.2 m) 5 1,100 Nm 5 1,100 J, que también es la ganancia en EP.

al boxeador. 89. La fuerza interna de los frenos lleva la rueda al reposo. Pero W

Fd (500 N)(2.2 m)

33. P =

=

=

= 786 W. 35. EP 5 mgh 5 (1,000 kg)

las ruedas, después de todo, están unidas al neumático que hace contacto con la t

t

1.4 s

superficie del camino. Es la fuerza del camino sobre los neumáticos lo que detiene (10 N/kg)(5 m) 5 50,000 Nm 5 50,000 J. 37. EC 5 ½

mv 2 5 ½(84 kg) al automóvil. 91. Cuando dos objetos interactúan, las fuerzas que ejercen uno (10 m/s)2 5 4,200 kg(m/s)2 5 4,200 J. 39. A partir de W 5 DEC, DEC 5

sobre el otro son iguales y opuestas y dichas fuerzas actúan de forma simultánea, Fd 5 (5,000 N)(500 m) 5 2,500,000 J.

de modo que los impulsos son iguales y opuestos. Por tanto, sus cambios en Piensa y resuelve

cantidad de movimiento son iguales y opuestos, y el cambio total en la cantidad 41. Trabajo E mgh 300 kg 10 N/k 6 m = 18,000 J. 43. A de movimiento de ambos objetos es cero. 93. Si consideras a Bronco como el tres veces la rapidez, tiene nueve veces (32) la EC y se deslizará nueve veces más: sistema, entonces una fuerza neta actúa y cambia la cantidad de movimiento. En 135 m. Dado que la fuerza de fricción es aproximadamente la misma en ambos ca-este caso, la cantidad de movimiento no se conserva. Sin embargo, si consideras al sos, la distancia tiene que ser nueve veces mayor para nueve veces más trabajo rea-sistema como Bronco y el mundo (incluido el aire), entonces todas las fuerzas que lizado por el pavimento sobre el automóvil. 45. A partir de F 3 d 5 F 9 3 d/ 4, actúan son fuerzas internas y la cantidad de movimiento se conserva. La cantidad se ve que F 9 5 4 F 5 200 N.

RESPUESTAS A PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR

S-7

47. (F 3 d)entrada 5 (F 3 d)salida movimiento también es cero. 91. En absoluto. Dado que la cantidad de mo-F 3 2 m 5 5,000 N 3 0.2 m

vimiento depende de la velocidad, pero la EC de la rapidez al cuadrado, la que F 5 [(5,000 N)(0.2 m)]/2 m 5 500 N

tenga mayor masa tiene mayor cantidad de movimiento. (La relación matemática 49. Potencia 5 Fd/t 5 (50 N)(8 m)/(4 s) 5 100 J/1 s 5 100 watts.

es p 2 2 m EC.) 93. Las tijeras y las cizallas son palancas. La fuerza aplicada Piensa y clasifica

suele ejercerse sobre una corta distancia para las tijeras, de modo que la fuerza de 51. (a) B, A, C; (b) C, B, A; (c) C, B, A 53. (a) D, B, C, E, A; (b) D, B, C, E, salida se ejerce sobre una distancia

relativamente larga (excepto cuando quieres A; (c) A, E, C, B, D

una gran fuerza de corte como para cortar un trozo de soga gruesa y colocas la Piensa y explica

soga cerca del "fulcro", de modo que puedes multiplicar la fuerza). Con cizallas 55. Detener un camión que lleva una carga ligera con la misma rapidez es más para cortar metal, los mangos son largos, de modo que una fuerza de entrada sencillo debido a que tiene menos EC y, por tanto, necesita menos trabajo para relativamente pequeña se ejerce sobre una distancia larga para producir una fuerza detenerse. (También es aceptable una respuesta en términos de impulso y cantidad de salida grande sobre una distancia corta. 95. Un motor que fuera 100% efi-de movimiento.) 57. Tu amigo realiza el doble de trabajo (4

ciente no se calentaría al tacto, ni expulsaría calor al aire, ni haría ruido, ni vibraría.

½ 1 1).

59. Se necesita más fuerza para estirar el resorte fuerte, de modo que se necesita Esto se debe a que todo lo anterior es transferencia de energía, que no puede ocurrir más trabajo para estirarlo la misma distancia que un resorte más débil. 61. La si toda la energía que se suministra al motor se transforma en trabajo útil. (En rea-EP calculada del arco tenso sería una sobreestimación (de hecho, aproximadamen-lidad, un motor con 100% de eficiencia incluso ni siquiera es posible en principio.

te el doble de su valor real) porque la fuerza aplicada para tensar el arco comienza Esto se discutirá en el Capítulo 18.) 97. En concordancia con la conservación en cero y aumenta hasta su valor máximo cuando está completamente tenso. Es de la energía, una persona que consume más energía de la que gasta almacena lo fácil ver que se necesita menos fuerza, y en consecuencia menos trabajo, para que queda como energía química agregada en el cuerpo, que en la práctica significa tensar el arco a la mitad que para tensarlo la segunda mitad hasta su posición más grasa. Quien gasta más energía de la que ingiere tiene que "quemar" la grasa de tensado completo. De modo que el trabajo realizado no es fuerza máxima corporal para conseguir energía adicional. Una persona desnutrida, para realizar

distancia de tensado, sino fuerza promedio

trabajo adicional tiene que consumir energía química almacenada en el cuerpo, distancia de tensado. En este caso,

donde la fuerza varía casi de manera directa con la distancia (y no como el cua-lo que no puede ocurrir durante mucho tiempo sin pérdida de salud, y de la vida.

drado o algún otro factor complicado), la fuerza promedio es simplemente igual a fuerza inicial fuerza final, dividido entre 2. De este modo, la EP es igual a la Piensa y discute

fuerza promedio aplicada (que sería cerca de la mitad de la fuerza en su posición 99. Conforme la población mundial continúa aumentando, la producción de totalmente tensa) multiplicada por la distancia a través de la cual se tensa la fle-energía también debe aumentar para ofrecer estándares de vida dignos. Sin paz, cha. 63. De acuerdo, porque la rapidez en sí es relativa al marco de referencia cooperación y seguridad, es probable que la producción de energía a escala global (consulta el Capítulo 3). Por tanto, ½ mv 2 también es relativa a un marco de refe-disminuya en lugar de aumentar. 101. Sí. Un automóvil quema más gasolina rencia. 65. Los dos están en lo correcto con respecto a los marcos de referencia cuando sus faros están encendidos. El consumo total de gasolina no depende de desde donde infieren. La EC es relativa. Desde tu marco de referencia, tu amiga si el motor está en marcha o no. Las luces y otros dispositivos se activan con la tiene EC considerable porque tiene una gran rapidez. Pero desde su marco de batería, lo cual "la agota". La energía utilizada para recargar la batería a final de referencia, su rapidez es cero y la EC también es cero. 67. Sin el uso de una cuentas proviene de la gasolina. 103. La energía solar es simplemente energía pértiga, la EC de correr horizontalmente no puede transformarse con facilidad en proveniente del Sol. La potencia solar, como la potencia en general, es la tasa EP gravitacional. Pero doblar una pértiga almacena EP elástica en la pértiga, la que a la cual se transfiere la energía. Por tanto, la potencia solar es la misma de una puede transformarse en EP gravitacional, de ahí las mayores alturas alcanzadas por hora a otra, mientras que la cantidad de energía solar depende de la cantidad los saltadores con pértigas muy elásticas. 69. Si a la bola se le da una EC inicial, de tiempo que se transfiere la energía. 105. Un automóvil con sus ventanas regresará a su posición de partida con esa misma EC (¡moviéndose en la otra di-abiertas experimenta más arrastre aerodinámico, lo que hace que más combustible rección!) y golpeará al instructor. (El procedimiento habitual en el salón de clase se queme para mantener el movimiento. Esto puede más que

anular los ahorros es soltar la bola desde la nariz en reposo. Entonces, cuando regrese, no tendrá EC

derivados de apagar el acondicionador de aire. 107. Tal vez tu amigo no se da y se detendrá poco antes de golpear la nariz.) 71. De acuerdo con el teorema, cuenta de que la masa en sí es energía condensada, de modo que puedes decir-una vez que el satélite está en movimiento, no se realiza trabajo sobre él (porque le que mucha más energía en su forma condensada se pone en el reactor de la la fuerza gravitacional no tiene componente paralelo al movimiento), de modo que sale del reactor. Cerca de 1% de la masa que experimenta fisión se convierte que no ocurre cambio en la energía. En consecuencia, el satélite cruza con una en energía de otras formas. 109. Cuando se habla del trabajo realizado, debes en-rapidez constante. 73. Las respuestas a ambas son iguales. Cuando la dirección tender trabajo realizado sobre qué, por parte de qué. El trabajo se realiza sobre de la fuerza es perpendicular a la dirección de movimiento, como es la fuerza de el automóvil mediante fuerzas aplicadas que se originan en el motor. El trabajo gravedad tanto en la bola de boliche sobre la bolera como sobre el satélite en órbita realizado por la carretera al reaccionar al empuje hacia atrás de los neumáticos circular, no hay ninguna componente de fuerza en la dirección de movimiento, o es igual al producto de la fuerza aplicada y la distancia recorrida, no la fuerza paralela a ésta, y la fuerza no realiza ningún trabajo. 75. La tensión de la cuerda neta que involucra la resistencia del aire y otras fuerzas de fricción. Cuando se es en todas partes perpendicular a la dirección de movimiento de la lenteja, lo cual realiza trabajo, se piensa en la fuerza aplicada; cuando se considera la aceleración, significa que no hay componente de tensión paralela a la trayectoria de la lenteja se piensa en la fuerza neta. En realidad, las fuerzas de fricción de los mecanismos y en consecuencia la tensión no realiza ningún trabajo. Por otra parte, la fuerza de internos del automóvil y en cierta medida de la propia carretera realizan trabajo gravedad tiene una componente paralela a la dirección de movimiento en todas negativo sobre el automóvil. El trabajo total cero explica por qué la rapidez del partes, excepto en el fondo del balanceo, y realiza trabajo, lo cual cambia la EC

automóvil no cambia. 111. La bola golpea el suelo con la misma rapidez, ya sea de la lenteja. 77. Los 100 J de energía potencial que no se destinan a aumentar que se lance hacia arriba o hacia abajo. Las bolas parten con la misma energía en el su energía cinética se convierten en energía térmica, que calienta sus asentaderas mismo lugar, de modo que tendrán la misma energía cuando lleguen al suelo. Esto y el tobogán. 79. Cuando una superbola golpea el suelo,

parte de su energía se significa que golpearán con la misma rapidez. Esto si supones que la resistencia del transforma en calor. Esto significa que tendrá menos energía cinética después del aire es despreciable, porque si la resistencia del aire es un factor, entonces la bola rebote que justo antes y no alcanzará su nivel original. 81. El diseño es imprác-lanzada hacia arriba perderá más energía en el aire durante su trayectoria más larga tico. Observa que la cima de cada colina en la montaña rusa tiene la misma altura, y golpeará con un poco menos de rapidez. Otra forma de ver esto es considerar de modo que la EP del carro en la cima de cada colina sería la misma. Si no se la Figura 3.8; en ausencia de resistencia del aire, la bola lanzada hacia arriba regre-gastara energía para superar la fricción, el carro llegaría a la segunda cima con tanta sará a su nivel de partida con la misma rapidez que la bola lanzada hacia abajo. Am-energía como la que tenía al partir. Pero en la práctica hay mucha fricción y el bas golpean el suelo con la misma rapidez (pero en diferentes tiempos). 113. Los carro no rodaría hasta su altura inicial ni tendría la misma energía. De modo que otros 15 caballos de fuerza los suministra la energía eléctrica proveniente de las ba-la altura máxima de cimas sucesivas deberá ser menor para compensar la fricción.

terías (que a final de cuentas se recargan usando energía de la gasolina). 115. La 83. Resulta suficiente fuerza porque, con cada bombeo del manubrio del gato, la pregunta puede reformularse: ¿(302 202) es mayor o menor que (202 102)? Se fuerza que ella ejerce actúa sobre una distancia mucho mayor que la que se eleva ve que (302 202) (900 400) 500, lo cual es considerablemente mayor el automóvil. Una pequeña fuerza que actúa sobre una distancia larga puede hacer que (202 102) (400 100) 300. De modo que la EC cambia más para

trabajo significativo. 85. Cuando la masa de un objeto se duplica sin cambio una v dada a una rapidez más alta. 117. (a) En concordancia con la segunda de rapidez, su cantidad de movimiento y su EC se duplican. 87. Ambas tienen ley de Newton, la componente de la fuerza gravitacional que es paralela al plano la misma cantidad de movimiento, pero la bola de 1 kg, la más rápida, tiene inclinado produce una aceleración paralela al plano. (b) En concordancia con el mayor EC. 89. Cero EC significa cero rapidez, de modo que la cantidad de teorema trabajo-energía, la componente de la fuerza multiplicada por la distancia

que recorre la bola es igual al cambio en la EC de la bola. 119. En una órbita aumenta el brazo de palanca de las ruedas delanteras sin sumarse mucho al circular, la fuerza de gravedad en todas partes es perpendicular al movimiento del peso del vehículo. A medida que las ruedas traseras se mueven en sentido de las satélite. Sin una componente de fuerza paralela a su movimiento, no se realiza tra-manecillas del reloj, el chasis tiende a girar contra las manecillas del reloj (conser-bajo y su EC permanece constante. 121. En el sentido popular, conservación de vación de cantidad de movimiento angular) y, por tanto, a levantar las ruedas de-energía significa que no se desperdicia energía. En el sentido físico, conservación lanteras del suelo. La mayor inercia rotacional y el creciente momento de torsión, de la energía se refiere a una ley de la naturaleza que subyace a los procesos natura-en sentido de las manecillas del reloj, de las ruedas delanteras más distantes conles. Si bien la energía puede desecharse (lo que en realidad significa transformarse trarrestan este efecto. 63. La bola que llega primero al fondo es aquella con la de una forma más útil a una menos útil), no puede destruirse. Ni tampoco puede inercia rotacional más pequeña comparada con su masa: la de softball. 65. No.

crearse. La energía se transfiere o se transforma, sin ganancia o pérdida. Eso es a lo Por definición, un momento de torsión exige tanto una fuerza como un brazo de que se refiere un físico cuando dice que la energía se conserva.

palanca. 67. No, porque hay brazo de palanca cero en torno al CM. Un brazo Capítulo 8

de palanca cero significa un momento de torsión cero. 69. Un autobús que se Preguntas conceptuales

balancea parcialmente gira parcialmente en torno a su CM, que está cerca de su 1. La rapidez tangencial se mide en metros por segundo; la rapidez rotacional parte media. Cuanto más lejos se siente uno del CM, mayor será el movimiento en RPM (revoluciones por minuto) o rotaciones por segundo. 3. El extremo hacia arriba y hacia abajo, como en un subibaja. Lo mismo ocurre con el movi-ancho tiene mayor rapidez tangencial que el extremo angosto. 5. Inercia rotamiento de un barco en mar picado o en un avión en aire turbulento. 71. La cional es la resistencia a un cambio en el movimiento rotacional. Es similar a la pértiga larga baja el CG del sistema equilibrado: el funámbulo y la pértiga.

inercia plana, que es una resistencia a un cambio en la velocidad. 7. La inercia La inercia rotacional de la pértiga también contribuye a la estabilidad. 73. El rotacional aumenta con el incremento de la distancia. 9. Un bate sostenido más movimiento bamboleante de una estrella es indicio de que gira alrededor de un cerca de su extremo masivo es más fácil de oscilar. 11. Un disco sólido tiene centro de masa que no está en su centro geométrico, lo que implica que existe menos inercia rotacional y tendrá mayor aceleración. 13. El brazo de palanca es alguna otra masa cercana que jala el centro de masa lejos del centro de la estrella.

la distancia más corta entre la fuerza aplicada y el eje de rotación. 15. El bastón Ésta es una manera en la que los astrónomos han descubierto planetas que exis-se bambolea, en realidad gira, en torno a su CM (o CG). 17. Tu CG está abajo ten alrededor de estrellas distintas del Sol. 75. La atmósfera de la Tierra es un de la soga. 19. Para un equilibrio estable, el CG debe estar arriba de la base de cascarón casi esférico, que, como un balón de básquetbol, tiene su centro de masa soporte y no extenderse más allá de ella. 21. Cuando intentas hacerlo, tu CG

en su centro; esto es, en el centro de la Tierra. 77. Es peligroso abrir los cajones se extiende fuera de tu base de soporte, de modo que caes. 23. La fuerza sobre superiores de un archivero completamente lleno que no está asegurado al suelo, la ropa es hacia adentro. 25. Ninguna fuerza es responsable; tiendes a moverte porque el CG del archivero puede desplazarse con facilidad fuera de la base de hacia adelante en línea recta y el automóvil se curva hacia ti. 27. El movimiento soporte del archivero. Cuando esto sucede, el momento de torsión que se produce rotacional da como resultado una fuerza centrífuga que actúa como la fuerza de hace que el archivero se venga abajo. 79. El CG del camión de la izquierda no gravedad. 29. La cantidad de movimiento angular de un sistema permanece está arriba de su base de soporte; el CG de los otros dos camiones está arriba de constante cuando no actúa un momento de torsión neto.

sus bases de soporte. Por tanto, sólo el primer camión se volteará. 81. No.

De acuerdo con la primera ley de Newton, en ausencia de una fuerza, un objeto Piensa y realiza

en movimiento sigue una trayectoria en línea recta. 83. La primera y tercera 31. Respuesta abierta. 33. Esto ocurre porque el CG cuelga por abajo del punto leyes de Newton ofrecen una explicación directa.

Tiendes a moverte en línea recta de soporte. 35. ¡Frente a la pared es más difícil! Para ambos sexos el CG se ex-

(primera ley de Newton), pero eres interceptado por la puerta. Presionas con -

tiende fuera de la base de soporte definida por los talones hasta la pared. 37. Si la tra la puerta porque la puerta presiona contra ti (tercera ley de Newton). El empu-moneda está en la línea hacia el centro de rotación, la fuerza "normal" sobre la mo-jón de la puerta proporciona la fuerza centrípeta que te mantiene en movimiento neda proporciona una fuerza centrípeta que la mantiene girando de manera estable.

en una trayectoria curva. Sin el empujón de la puerta, no girarías con el automó-Sustituye y listo

vil; te moverías a lo largo de una línea recta y serías "lanzado". La explicación no 39. t 5 0.5 m 3 50 N 5 25 m?N. 41. F 5 (80 kg)(3 m/s)2/2 m 5 360 N.

necesita invocar a la fuerza centrífuga. 85. Un automóvil puede permanecer en 43. Momento angular 5 mvr 5 (80 kg)(6 m/s)(2 m) 5 960 kg?m2/s.

una pista totalmente resbalosa si el componente horizontal de su fuerza normal es Piensa y resuelve

suficiente para proporcionar la fuerza centrípeta necesaria. 87. En concordancia 45. (a) Momento de torsión = fuerza 3 brazo de palanca 5 (0.25 m)(80 N) con la primera ley de Newton, en cada momento la tendencia del ocupante es a 20 Nm. (b) Fuerza 200 N. Entonces, (200 N)(0.10 m) 20 Nm. (c)

moverse en una trayectoria en línea recta. Pero el suelo intercepta esta trayectoria Sí. Estas respuestas suponen que tú empujas en sentido perpendicular respecto y ocurre un par de fuerzas; el suelo presiona contra sus pies y sus pies presionan del mango de la llave. De otro modo, necesitarías ejercer más fuerza para ob-contra el suelo: tercera ley de Newton. El empujón del suelo sobre sus pies protener el mismo momento de torsión. 47. La masa de 1 kg pesa 10 N. En la porciona la fuerza centrípeta que la mantiene en movimiento en un círculo con marca de 50 cm, momento de torsión 10 N 0.5 m 5 Nm; en la marca

el hábitat. Ella percibe esto como una gravedad artificial. 89. (a)

Excepto por de 75 cm, momento de torsión 10 N0.75 m 7.5 Nm, y en la marca de

la fuerza de fricción vertical, no hay otra fuerza vertical más que el peso de la 100 cm, momento de torsión 10 N 1.0 m 10 N·m. De modo que en

motocicleta el conductor. (b) El vector horizontal representa la fuerza normal.

la marca de 75 cm el momento de torsión es 7.5/5 1.5 veces mayor, y en la Dado que es la única fuerza que actúa en la dirección radial, horizontalmente, marca de 100 cm, el momento de torsión es el doble de lo que es en la marca de también es la fuerza centrípeta. De modo que es ambas. 91. Conforme te des-50 cm. 49. El artista girará 3 veces por segundo. Por la conservación de la canti-plazas hacia afuera, la inercia rotacional del sistema aumenta (como las masas dad de movimiento angular, el artista aumentará la tasa de rotación por 3; esto es, sostenidas hacia afuera en la Figura 8.52). En concordancia con la conservación I

de la cantidad de movimiento angular, desplazarse hacia el borde exterior aumenta antes 5 I después

I

la inercia rotacional del sistema en rotación y reduce la rapidez angular. 93. El antes 5 [(⅓) I(3)]después

suelo que se barre hacia el río se deposita a mayor distancia del eje de rotación de Piensa y clasifica

la Tierra. Así como el hombre en la tornamesa frena cuando una de las masas se 51. B, C, A 53. B, A, C 55. C, A, B

extiende, la Tierra frena en su movimiento rotacional y extiende la duración del Piensa y explica

día. Desde luego, la cantidad de frenado es muy pequeña. 95. En concordancia 57. Los neumáticos de Sue tienen mayor rapidez rotacional porque deben girar con la conservación de la cantidad de movimiento angular, conforme la distancia más veces para cubrir la misma distancia. 59. La cantidad de inclinación se radial de la masa aumenta, la rapidez angular disminuye. La masa del material relaciona con la cantidad de curvatura que tiene la vía. En una curva donde la usado para construir rascacielos se levanta, lo que

aumenta un poco la distancia vía exterior es, por decir, 10% más larga que la vía interior, la parte ancha de radial respecto del eje de rotación de la Tierra, lo cual tiende a reducir ligeramente la rueda también tendrá que ser al menos 10% más ancha que la parte angosta.

la tasa de rotación de la Tierra, y a hacer los días un poco más largos. El efecto Si es menos que esto, la rueda exterior se apoyará en el borde para permanecer contrario ocurre con las hojas que caen conforme disminuye su distancia radial en la vía, y habrá raspaduras conforme el tren negocie la curva. Mientras más respecto del eje de la Tierra. Para fines prácticos, ¡estos efectos son completamente

"cerrada" sea la curva, mayor será la inclinación necesaria para estar sobre las rue-despreciables! 97. En concordancia con la conservación de la cantidad de modas. 61. Inercia rotacional y momento de torsión son los conceptos principales vimiento angular, si la masa se aleja más del eje de rotación, como sucede con las ilustrados aquí, y la conservación de la cantidad de movimiento angular tam-capas de hielo que se funden, la rapidez rotacional disminuye. De modo que la bién es importante. La distancia larga respecto de las ruedas delanteras aumenta Tierra frenaría en su rotación diaria. 99. La fuerza gravitacional que actúa sobre la inercia rotacional del vehículo en relación con las ruedas traseras y también toda partícula por toda otra partícula hace que la nube se condense. Entonces, la

RESPUESTAS A PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR

S-9

disminución del radio de la nube se acompaña de un aumento en la rapidez an-Sustituye y listo

gular debido a la conservación de la cantidad de movimiento angular. El aumento de rapidez resulta en que muchas estrellas se lanzan hacia una forma de disco.

m m

33. =

1 2 = 6.67 × −

F G

10 11N

2

2

• m /kg ×

Piensa y discute

d 2

101. Los neumáticos con diámetro grande significan que viajas más lejos con (1 kg)(6 ×1024 kg) =

cada revolución del neumático. De modo que te moverás más rápido de lo que 9.8 N

(6.4 ×106 m)2

indica tu velocímetro. (Un velocímetro en realidad mide las RPM de las ruedas y muestra esto como mi/h o km/h. La conversión de RPM a la lectura en mi/h m m

35. =

1 2 = 6.67 × −

F G

10 11N

2

2

• m /kg ×

o km/h supone que las ruedas tienen cierto tamaño.) Las ruedas de gran tamaño d 2

proporcionan una lectura muy baja porque en realidad recorren más distancia (6 ×1024 kg)(7.4 ×1022kg)

20

por revolución de lo que indica el velocímetro, y una rueda de menor tama-

= 2.1×10 N

(3.8 ×108 m)2

ño proporciona una lectura muy alta porque las ruedas no van tan rápido por revolución. 103. Dos condiciones son necesarias para el equilibrio mecánico: m m

37. F = G 1 2 = 6.67 × −

10 11N

2

2

• m /kg ×

2

F 0 y momento de torsión 0. 105. La fricción del camino sobre las d

llantas produce un momento de torsión en torno al CM del automóvil. Cuando (3 kg)(6.4 ×1023 kg) = 4.1× −8

el automóvil acelera hacia adelante, la fuerza de fricción apunta hacia adelante y 10 N

(5.6 ×1010 m)2

gira el frente del automóvil hacia arriba. Cuando el automóvil frena, la dirección de la fricción es hacia atrás, y el momento de torsión hace girar al automóvil en la dirección opuesta, de modo que el extremo posterior gira hacia arriba (y la Piensa y resuelve

nariz hacia abajo). 107. El agua se desliza al interior de la lata, mientras que 39. A partir de F GmM/ d 2, tres veces d al cuadrado es 9 d 2, lo cual significa que el hielo rueda junto con la lata. Cuando el agua en el interior se desliza, apor-la fuerza es un noveno del peso superficial.

ta peso en lugar de inercia rotacional a la lata. De modo que la lata con agua 41. A partir de F 5 G2 m 2 M/(2 d 2) 5 4/4 (GmM/d 2), con la misma fuerza de rodará más rápido. (Incluso vencerá a una lata hueca.) 109. Aconseja al niño gravitación.

—

usar ruedas con la mínima inercia rotacional: las que son sólidas y ligeras sin GM (6.67 ×10 11)(6.0 ×1024)

43. g =

=

= 9.24 N/kg o 9.24 m/s2;

rayos (con forma de disco en lugar de aro). 111. El peso del niño se compensa d 2

[(6,380 + 200) ×103]2

con el peso del tablón, que puede considerarse como concentrado en su CG en 9.24/9.8 5 0.94 o 94%.

el lado opuesto del fulcro. Está en equilibrio cuando su peso multiplicado por su distancia respecto del fulcro es igual al peso de todo el tablón multiplicado Piensa y clasifica

por la distancia entre el fulcro y el punto medio (CG) del tablón. (¿Cómo se 45. B 5 C, A, D 47. (a) B, A 5 C, D; (b) D, A 5 C, B 49. B, A, C

relacionan los pesos relativos del niño y del tablón con los brazos de palanca re -

lativos?) 113. La pista permanece en equilibrio conforme las bolas ruedan ha-Ejercicios

cia afuera y hasta que la bola rueda fuera de la pista. Esto es así porque el CG

51. Esto se remonta al Capítulo 4. Un cuerpo pesado no cae más rápido que un del sistema permanece sobre el fulcro. Por ejemplo, supón que la bola de billar cuerpo ligero porque la mayor fuerza gravitacional sobre el cuerpo más pesado (su tiene el doble de masa que la bola de golf. Por conservación de la cantidad de peso) actúa sobre una masa correspondientemente más grande (inercia). La razón movimiento, la bola con el doble de masa rodará hacia afuera a la mitad de la entre fuerza gravitacional y masa es la misma para todos los cuerpos, de ahí que rapidez de la bola más ligera, y en cualquier tiempo estará a la mitad del pun-todos los cuerpos en caída libre aceleren igualmente. 53. La fuerza de gravedad to de partida que la bola más ligera. De modo que no hay cambio en el CG

es la misma sobre cada uno porque las masas son iguales, como lo demuestra del sistema de las dos bolas. Los momentos de torsión producidos por los pe-la ecuación para fuerza gravitacional de Newton. 55. La fuerza disminuye como sos de las bolas multiplicados por sus distancias relativas respecto del fulcro son el cuadrado de distancia creciente, o la fuerza aumenta con el cuadrado de la dis-iguales en todos los puntos, porque en cualquier momento la bola menos masi-tancia decreciente. 57. En concordancia con la tercera ley de Newton, el peso va tiene un brazo de palanca correspondientemente más largo. 115. El ecuador de la Tierra en el campo gravitacional de Larry es 300 N, lo mismo que el peso de tiene una mayor rapidez tangencial que las latitudes al norte o al sur. Cuando Larry en el campo gravitacional de la Tierra. 59. Si dejas que la ecuación de la un proyectil se lanza desde alguna latitud, la rapidez tangencial de la Tierra se gravitación guíe tu razonamiento, el doble de diámetro es el doble de radio, lo que imparte al proyectil, y a menos que se hagan correcciones, el proyectil fallará un corresponde a 1/4 el peso del astronauta en la superficie del planeta. 61. Tu peso blanco que viaje con la Tierra a una rapidez tangencial diferente. Por ejemplo, si disminuiría si la Tierra se expandiera sin cambio en su masa y aumentaría si la Tie-un cohete se dispara al sur desde la frontera canadiense hacia la frontera mexicana, rra se contrajera sin cambio en su masa. Tu masa y la masa de la Tierra no cambian, su componente canadiense de rapidez debido al giro de la Tierra es menor que la pero la distancia entre tú y el centro de la Tierra sí cambia. La fuerza es proporcio-rapidez tangencial de la Tierra más hacia el sur. La frontera mexicana se mueve nal al inverso al cuadrado de esta distancia. 63. El jet que vuela alto no está en más rápido y el cohete se queda corto. Debido a que la Tierra gira hacia el este, el caída libre. Se mueve con velocidad aproximadamente constante, de modo que cohete aterriza al oeste de su longitud pretendida. (En un tiovivo, intenta lanzar un pasajero no experimenta fuerza neta. La fuerza de sostén hacia arriba del asien-una bola de ida y vuelta con tus amigos. El nombre de esta alternación debida a to coincide con el jalón descendente de la gravedad, lo que proporciona la sensa-la rotación es efecto Coriolis.)

ción de peso. El vehículo espacial en órbita, por otro lado, está en un estado de caída libre. El asiento no ofrece fuerza de sostén porque cae con la misma tasa que Capítulo 9

el pasajero. Sin fuerza de sostén, la fuerza de gravedad sobre el pasajero no se per-Preguntas conceptuales

cibe como peso. 65. En un automóvil que salta de una colina tú "flotas" porque 1. Newton descubrió que la gravedad es universal. 3. La Luna se aleja de la el automóvil ya no ofrece una fuerza de sostén. Tanto tú como el automóvil están línea recta que seguiría si no hubiera fuerza gravitacional que actuara sobre ella.

en el mismo estado de caída libre. Pero la gravedad todavía actúa sobre ti, como lo 5. La fuerza gravitacional es 6 1011 N. 7. En realidad, la masa de la Tierra demuestra tu aceleración hacia el suelo. De modo que, por definición, tú estarías podría calcularse entonces, pero pesar la Tierra tenía un tono más popular. 9. El ingrávido (hasta que la resistencia del aire se vuelva importante). 67. El lápiz grosor es de un cuarto. 11. Los resortes estarían más comprimidos cuando acele-tiene el mismo estado de movimiento que tú. La fuerza de gravedad sobre el lá-rara hacia arriba; menos comprimidos cuando acelerara hacia abajo. 13. Tu peso piz hace que acelere hacia abajo junto contigo. Aunque el lápiz flota en relación se mide como mg cuando estás firmemente apoyado y en equilibrio. 15. Los contigo, él y tú caen en relación con la Tierra. 69. No estás de acuerdo porque la ocupantes están sin una fuerza de sostén. 17. Un lado está más cerca. 19. Sí.

fuerza de gravedad sobre los astronautas en órbita es casi tan fuerte como en la suLas mareas interiores son causadas por fuerzas desiguales sobre lados opuestos del perficie de la Tierra. Ellos sienten ingravidez debido a la ausencia de una fuerza de interior de la Tierra. 21. No. Ningún brazo de palanca existiría entre el jalón gra-sostén. 71. Tu peso es igual a mg cuando estás en equilibrio sobre una superficie vitacional de la Tierra y el eje de la Luna. 23. En el centro de la Tierra, su campo horizontal y las únicas fuerzas que actúan sobre ti son mg hacia abajo y una fuerza gravitacional es cero. 25. En cualquier parte del interior de un planeta hueco el normal, igual y opuesta, N hacia arriba. 73. La fuerza debida a la gravedad, campo gravitacional del planeta sería cero. 27. Tu peso aumentaría. 29. Un mg, no varía con los saltos. Las variaciones en las lecturas de la báscula son variacio-agujero negro es invisible porque ni siquiera la luz puede escapar de él.

nes en la fuerza de sostén N, no en mg. 75. El jalón gravitacional del Sol sobre la Piensa y realiza

Tierra es mayor que el jalón gravitacional de la Luna. Sin embargo, las mareas son 31. Respuesta abierta.

causadas por las diferencias en las fuerzas gravitacionales de la

opuestos de la Tierra. La diferencia en fuerzas gravitacionales de la Luna sobre la-la resistencia del aire no sólo lo frenaría sino que lo quemaría por su gran rapidez.

dos opuestos de la Tierra es mayor que la diferencia correspondiente en las fuerzas Un satélite no debe luchar con alguno de éstos. 13. La rapidez de un satélite no por el jalón más fuerte pero mucho más distante del Sol. 77. No. Las mareas son cambia cuando no hay una componente de fuerza gravitacional en la dirección causadas por diferencias en jalones gravitacionales. Si no hubiera diferencias en de su movimiento. 15. El periodo para satélites a mayores altitudes es más largo los jalones, no habría mareas. 79. Las mareas más bajas ocurren junto con ma -

que 90 minutos. 17. Un satélite tiene la mayor rapidez cuando está más cerca reas más altas: mareas vivas. De modo que el ciclo de marea viva consiste en de la Tierra, y la menor rapidez cuando está más alejado. 19. Kepler descubrió mareas más altas que la altura promedio, seguidas por mareas más bajas que el bajo que el periodo al cuadrado era proporcional a la distancia radial al cubo. 21. La promedio (¡mejor para buscar almejas!). 81. Debido a su tamaño relativamen-EC es constante porque la gravedad no realiza ningún trabajo sobre el satélite pequeño, diferentes partes del Mediterráneo y otros cuerpos de agua relativa -

te. 23. Sí. La rapidez de escape puede ser a rapideces menores que 11.2 km/s si mente pequeños en esencia están equidistantes de la Luna (o del Sol). De modo dicha rapidez es sostenida.

que ninguna parte es jalada con una fuerza muy diferente que cualquiera otra par-Piensa y realiza

te. Esto resulta en mareas extremadamente pequeñas. Las mareas son causadas por 25. Descubrir esta conexión entre el agua que cae y satélites que caen fue un diferencias considerables en los jalones. 83. En concordancia con la ley del inver-momento "ajá" para PGH mientras daba vueltas a un balde con agua durante una so al cuadrado, el doble de distancia desde el centro de la Tierra disminuye el valor demostración pedagógica del movimiento rotacional, un día cuando se discutió de g a ¼ su valor en la

superficie, o 2.5 m/s2. 85. Tu peso disminuiría en el tiro de el lanzamiento de un satélite muy publicitado. ¡Qué emocionante es descubrir la mina. Una forma de explicar esto es considerar que la masa de la Tierra que está conexiones en la naturaleza!

arriba de ti te jala hacia arriba. Este efecto reduce tu peso, de la misma manera como se reduce si alguien te jala hacia arriba mientras estás parado sobre una báscula. O, Piensa y resuelve

de manera más exacta, se ve que tú efectivamente estás dentro de un cascarón esfé-27. (a) A partir de y 5 5 t 2 5 5(30)2 5 4,500 m, o 4.5 km de altura (4.4 km si rico donde la aportación del campo gravitacional es cero, y que tú eres jalado sólo usas g 5 9.8 m/s2). (b) En 30 segundos; d 5 vt 5 280 m/s 3 30 s 5 8,400 m.

por la porción esférica abajo de ti. Eres más ligero mientras más profundo vayas, y (c) El motor está directamente abajo del avión. (En un caso más práctico, el avión si el tiro de la mina teóricamente continuara hacia el centro de la Tierra, tu peso se supera la resistencia del aire gracias a sus motores, pero eso no sucede con el motor acercaría cada vez más a cero. 87. Respuesta abierta.

que cae, de modo que la rapidez del motor se reduce por el arrastre aerodinámico y cubre menos que 8,400 metros horizontales, y aterriza detrás del avión.) 29. En Piensa y discute

lo alto de su trayectoria, la componente vertical de la velocidad es cero, lo que 89. La fuerza de gravedad sobre las rocas lunares en la superficie de la Luna es deja sólo la componente horizontal. La componente horizontal en lo alto o en mucho más fuerte que la fuerza de gravedad de la Tierra distante. Las rocas sol-cualquier parte de la trayectoria es la misma que la componente horizontal inicial, tadas sobre la Luna caen sobre la superficie de la Luna. (La fuerza de la gravedad 100 m/s (el lado de un cuadrado donde la diagonal es 141). 31. Energía total de la Luna es aproximadamente 1/6 del peso que la roca tendría en la Tierra, 5 5,000 MJ 1 4,500 MJ 5 9,500 MJ. Resta 6,000 MJ y EC 5 3,500 MJ.

pero la fuerza de la gravedad de la Tierra a dicha distancia sólo es de aproxi-33. El tiempo "de vuelo" depende sólo de la componente vertical de la velocidad madamente 1/3,600 el peso terrestre de la roca.) 91. La ubicación está más inicial y de la correspondiente distancia vertical alcanzada. A partir de d 5 t 2, un cerca de la Luna debido a su masa más pequeña y su menor jalón a distancias salto vertical de 1.25 m corresponde a 0.5 s (t = 2 d g

/ = 2(1.25) /10 = 0.5 s).

iguales. 93. La Tierra y la Luna sí giran alrededor de un punto común, pero Duplica esto (tiempo hacia arriba y tiempo hacia abajo) para un tiempo en el aire no está a medio camino entre ellas (lo que requeriría que tanto la Tierra como la de 1 s. El tiempo en el aire es el mismo cualquiera que sea la distancia horizontal Luna tuvieran la misma masa). El punto en torno al cual giran la Tierra y la Luna recorrida.

(llamado baricentro) está dentro de la Tierra, aproximadamente a 4,600 km del Piensa y clasifica

centro de la Tierra. 95. Por la geometría de la Figura 9.4, triplicar la distancia 35. (a) B, C, A, D; (b) B, D, A, C; (c) A 5 B 5 C 5 D (10 m/s2) 37. (a) A, desde la fuente pequeña dispersa la luz sobre 9 veces el área, o 9 m2. Cinco veces B, C; (b) C, B, A

la distancia dispersa la luz sobre 25 veces el área o 25 m2, y 10 veces la distancia, Piensa y explica

100 m2. 97. Si la Tierra ganara masa, tú ganarías peso. Debido a que la Tierra 39. Los clavadistas pueden orientar sus cuerpos para cambiar la fuerza de la re-está en caída libre alrededor del Sol, el Sol no contribuye a tu peso. La gravitación sistencia del aire de modo que la razón de la fuerza neta con respecto a la masa terrestre te presiona contra la Tierra; la gravitación solar no te presiona contra la sea casi la misma para cada uno. 41. Sí. Golpeará con mayor rapidez en el Tierra. 99. La fuerza gravitacional varía con la distancia. A mediodía estás más mismo tiempo porque la componente horizontal (no la vertical) de movimiento cerca del Sol; a medianoche estás un diámetro terrestre adicional más alejado.

es mayor. 43. La caja no golpeará al Porsche, sino que caerá a una distancia Por tanto, la fuerza gravitacional del Sol sobre ti es mayor a mediodía. 101. La más lejana que está determinada por la altura y la rapidez del avión. 45. (a) La Luna sí gira como una peonza conforme da vueltas alrededor de la Tierra. Gira trayectoria es una parábola. (b) Las trayectorias serían líneas rectas. 47. La ra-una vez por revolución, por lo cual se ve sólo la misma cara. Si no girara, verías el pidez mínima de la bola ocurre en la parte superior, que es la misma que la reverso cada medio mes. 103. Tierra. Las micromareas son más grandes donde componente horizontal de la velocidad en cualquier parte a lo largo de la trayec-la diferencia entre tu cabeza y tus pies es mayor comparada con la distancia res-

toria. 49. Ambas bolas tienen el mismo rango (consulta la Figura 10.9). Sin pecto del cuerpo que jala, la Tierra. 105. Se necesita más combustible para que embargo, la bola con el ángulo de proyección inicial de 30 está en el aire durante un cohete que sale de la Tierra vaya a la Luna que al revés. Esto es así porque un un tiempo más corto y golpea el suelo primero. 51. Cualquier objeto proyec-cohete debe moverse contra el mayor campo gravitacional de la Tierra la mayor tado en sentido vertical tiene rapidez cero en la parte superior de su trayectoria.

parte del camino. (Si se lanzara desde la Luna hacia la Tierra, el cohete viajaría con Pero si se dispara en un ángulo, sólo su componente vertical de velocidad es cero el campo de la Tierra la mayor parte del camino.) 107. F m m / d 2, donde m 1 2

2

y la velocidad del proyectil en la parte superior es igual a su componente hori-es la masa del Sol (que no cambia cuando forma un agujero negro), m es la masa 1

zontal de velocidad. Esto sería 100 m/s cuando el proyectil de 141 m/s se dispare de la Tierra en órbita y d es la distancia entre el centro de masa de la Tierra y el Sol.

a 45. 53. El tiempo "de vuelo" será el mismo. El tiempo de vuelo se relaciona Ninguno de estos términos cambia, de modo que la fuerza F que mantiene a la con la altura vertical alcanzada en un salto, no con la distancia horizontal recorri-Tierra en órbita no cambia. 109. Los astronautas están ingrávidos porque care-da en un suelo plano. 55. De acuerdo con la tercera ley de Kepler, T 2 R 3, el cen de una fuerza de sostén, pero están firmemente asidos a la gravedad terrestre, periodo es mayor cuando la distancia es mayor. De modo que los periodos de los lo cual explica que den vueltas alrededor de la Tierra en lugar de salir disparados planetas más alejados del Sol son más largos que el año terrestre. 57. La rapidez en línea recta hacia el espacio exterior.

no depende de la masa de un objeto o un satélite que cae (como la rapidez de Capítulo 10

caída libre no lo hace). 59. La gravitación suministra la fuerza centrípeta para Preguntas conceptuales

los satélites. 61. La gravedad cambia la rapidez de una bala de cañón cuan-1. Un proyectil es cualquier objeto que se proyecta por

algún medio y continúa en do la bala se mueve en la dirección de la gravedad de la Tierra. A rapideces bajas, movimiento por su propia inercia. 3. Sin resistencia del aire la componente ho-la bala de cañón se curva hacia abajo y gana rapidez porque existe una compo-rizontal de la velocidad permanece constante, tanto al subir como al caer. 5. En nente de la fuerza de gravedad a lo largo de su dirección de movimiento. Sin 1 s, el proyectil cae 5 m bajo la línea; en 2 s, 20 m bajo ella. 7. Un ángulo de embargo, disparada con suficiente rapidez, la curvatura coincide con la curva-15 produciría el mismo rango, en concordancia con la Figura 10.11. 9. Un tura de la Tierra, de modo que la bala de cañón se mueve en ángulo recto con proyectil puede caer alrededor de la Tierra si tiene suficiente rapidez tangencial la fuerza de gravedad. Sin componente de fuerza a lo largo de su dirección de de modo que su curva hacia abajo no sea más aguda que la de la curvatura de movimiento, su rapidez permanece constante. 63. Un satélite viaja más rápi-la Tierra. 11. Un satélite tiene que permanecer arriba de la atmósfera porque do cuando está más cerca del cuerpo que orbita. Por tanto, la Tierra viaja más

RESPUESTAS A PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR

rápido alrededor del Sol en diciembre que en junio. 65. La componente a Capítulo 11

lo largo de la dirección de movimiento realiza trabajo sobre el satélite para Preguntas conceptuales

cambiar su rapidez. La componente perpendicular a la

1. John Dalton anticipó la idea de los átomos. 3. Albert Einstein explicó el dirección de movimiento cambia su dirección de mo-movimiento browniano. 5. La mayoría de los átomos a tu alrededor

son más vimiento. 67. Cuando la velocidad de un satélite es

antiguos que el Sol. 7. Los átomos son más grandes que la longitud de onda en todas partes perpendicular a la fuerza de gravedad,

de un haz de electrones. 9. Casi toda la masa de un átomo se concentra en su la trayectoria orbital es un círculo (consulta la Figura

núcleo. 11. La carga eléctrica es la misma en los protones y los electrones, con lo 10.30). 69. De ninguna manera. El centro de la Tie-positivo del protón y lo negativo del electrón. 13. El hidrógeno tiene los átomos rra es un foco de la trayectoria elíptica (incluido el caso

más ligeros. 15. Los átomos más pesados se forman por fusión en el interior de especial de un círculo), de modo que un satélite terres-las estrellas. 17. Oxígeno, carbono, hidrógeno, nitrógeno y calcio son los más tre orbita el centro de la Tierra. El plano de un satélite

comunes en el ser humano. 19. El máximo número de capas en los átomos es que viaja en órbita siempre interseca el centro de la Tierra. 71. Si una caja de siete. 21. Los átomos más pesados no son mucho más grandes debido a que la herramientas o cualquier cosa se "suelta" desde un vehículo espacial en órbita, carga más grande del núcleo ejerce una mayor atracción eléctrica. 23. El nú-tiene la misma rapidez tangencial que el vehículo y permanece en órbita. Si mero de masa es el número de protones y neutrones en el núcleo, un entero. La una caja de herramientas se suelta desde un jet que vuela alto, también tiene la masa atómica es la masa total de un átomo, en gramos, kilogramos o unidades rapidez tangencial del jet. Pero esta rapidez es insuficiente para que la caja caiga de masa atómica. 25. Una mezcla es una sustancia mezclada sin enlace químico, alrededor de la Tierra. En lugar de ello, pronto cae a la Tierra. 73. Cuando por ejemplo, arena y sal, o aire. 27. La energía es la misma: energía de separación una cápsula se proyecta hacia atrás a 7 km/s con respecto a la nave espacial, que igual a energía de recombinación. 29. Cuando la materia encuentra antimateria, en sí misma se mueve hacia adelante a 7 km/s con respecto a la Tierra, la rapidez masas iguales de cada una se aniquilan.

de la cápsula con respecto a la Tierra será cero. No tendrá rapidez tangencial para Piensa y realiza

orbitar. ¿Qué sucederá? Simplemente caerá en sentido vertical hacia

la Tierra y 31. Sí. La vela arderá el doble de tiempo porque hay el doble de oxígeno en el chocará. 75. La velocidad tangencial de la Tierra alrededor del Sol es 30 km/s.

frasco con el doble de tamaño.

Si un cohete que lleva los desechos radiactivos se disparara a 30 km/s desde la Tierra en la dirección opuesta al movimiento orbital de la Tierra alrededor Piensa y clasifica

del Sol, los desechos no tendrían velocidad tangencial con respecto al Sol. Sólo 33. (a) A, D, B, C; (b). A, D, B, C; (c) A, D, B, C 35. A, B, D, C

caerían hacia el Sol. 77. Hay varias ventajas potenciales. Una principal es evi-Piensa y explica

tar los costosos cohetes de primera etapa. Además, la aeronave, al volar hacia 37. En una molécula de agua, H O, existen tres átomos, dos de hidrógeno y 2

el este, puede impartir rapidez inicial agregada al vehículo espacial. Y el vehículo uno de oxígeno. 39. La rapidez a la cual viaja la esencia de una fragancia es espacial tiene menos resistencia de aire que superar y un poco menos EP para mucho menor que la rapidez de cada una de las moléculas que la constituyen remontar. 79. La máxima rapidez de caída en virtud sólo de la gravedad de debido a las muchas colisiones entre las moléculas. Aunque la rapidez molecula Tierra es 11.2 km/s (consulta la Tabla 10.1 o la nota al pie 5 del capítulo).

lar entre colisiones es grande, la tasa de migración en una dirección particular 81. El satélite experimenta la mayor fuerza gravitacional en A, donde está más a través de moléculas que obstruyen es mucho menor. 41. H , He, Na y U

2

cerca de la Tierra, el perigeo. Experimenta la mayor rapidez y la mayor velocidad son elementos puros; H O y NaCl son compuestos hechos con dos elementos; y 2

en A, y por la misma razón, la mayor cantidad de movimiento y la mayor energía tres elementos diferentes contribuyen al H SO . 43. El movimiento browniano 2

cinética en A. Tiene la mayor energía potencial gravitacional en el punto más se debe a que más átomos o moléculas saltan contra un lado de una pequeña lejano C. Tiene la misma energía total (EC EP) en todas partes de su órbita, partícula que en el otro. Esto produce una fuerza neta sobre la partícula, que al igual que la misma cantidad de movimiento angular porque se conserva. Tiene altera su movimiento. Dicho movimiento browniano no se observa en partículas la mayor aceleración en A, donde F/ m es mayor.

más grandes porque el número de saltos sobre lados opuestos es casi igual, y la inercia de la partícula más grande es mayor. Cualquier movimiento browniano de Piensa y discute

una pelota de béisbol sería imperceptible. El número de saltos sobre una pelota 83. Al patear el balón en ángulos mayores que 45 se sacrifica cierta distan -

de béisbol prácticamente es el mismo en todos lados, sin fuerza neta ni cambio cia para ganar tiempo adicional. Un balón pateado a más de 45 no va muy en el movimiento de la pelota de béisbol. 45. (a) En ambos isótopos hay 27

lejos, pero permanece en el aire más tiempo, lo que da a los jugadores del equipo protones (consulta la tabla periódica). En el Co-59 hay 32 neutrones, y en el que patea una oportunidad para correr por el campo y acercarse al jugador del Co-60 hay 33 neutrones. (b) El número de electrones en órbita coincide con otro equipo que recibe el balón. 85. Marte o cualquier cuerpo en la órbita el número atómico, 27. 47. Permanece el núcleo de carbono. 49. Radón de la Tierra tardarían el mismo tiempo para orbitar. El movimiento de un satélite, es el resultado. 51. Para volverse positivo, un átomo pierde un electrón. 53. Los como el de un objeto en caída libre, no depende de la masa. 87. Los cohetes otros gases inertes son neón, argón, criptón, xenón y radón. 55. Los protones para poner satélites en órbita se disparan hacia el este para aprovechar el giro contribuyen más a la masa de un átomo, y los electrones más al tamaño de un de la Tierra. Cualquier punto sobre el ecuador de la Tierra se mueve a casi átomo. 57. Las moléculas de hidrógeno, que tienen menos masa, se mueven 0.5 km/s con respecto al centro de la Tierra o el eje polar de la Tierra. Esta rapi-más rápido que las moléculas de oxígeno más pesadas. 59. Respuesta abierta.

dez adicional no tienen que proporcionarla los motores del cohete. A

latitudes más altas, este "viaje extragratuito" es menor. 89. La Luna no tiene atmósfera Piensa y discute

porque la velocidad de escape en la superficie de la Luna es menor que la rapidez 61. El cuerpo no tendría olor si todas sus moléculas permanecieran en su in-de cualquier gas atmosférico. Un satélite 5 km arriba de la superficie de la Tierra terior. Un cuerpo tiene olor sólo si algunas de sus moléculas entran en la na-todavía está en una atmósfera considerable así como en el rango de algunos picos riz. 63. Dado que los átomos de aluminio son menos masivos que los átomos montañosos. El arrastre atmosférico es el factor que más determina la altitud or-de plomo, en una muestra de 1 kg hay más átomos de aluminio que átomos de bital. 91. Singapur se encuentra en el ecuador de la Tierra. El plano de la órbita plomo. 67. En realidad tú eres parte de todas las personas que te rodean en ecuatorial del satélite incluye Singapur, de modo que un satélite puede localizarse el sentido de que estás compuesto de átomos no sólo de todas las personas a tu directamente arriba de Singapur. Pero en San Francisco, un satélite geosíncrono alrededor, ¡sino también de todas las personas que hayan vivido sobre la Tierra!

sobre el ecuador es visto en un ángulo con la vertical, no directamente sobre la ca-La afirmación de la pequeña Andrea Wu en la fotografía de inicio de la Parte 2 es beza. 93. A medianoche no miras al Sol y, por tanto, no puedes ver los planetas indiscutible. Y los átomos que ahora están en ti constituirán la alberca atómica de más cercanos al Sol: Mercurio y Venus (que se encuentran dentro de la órbita de la que otros se servirán. 69. Pensaban que una molécula está hecha de un átomo la Tierra). 95. No, porque una órbita en el plano del Círculo Ártico no inter-de hidrógeno y un átomo de oxígeno: HO.

seca el centro de la Tierra. Todos los satélites terrestres orbitan en un plano que interseca el centro de la Tierra. Un satélite puede pasar sobre el Círculo Ártico, mas no puede permanecer arriba de él de manera indefinida, como un satélite Capítulo 12

puede hacerlo sobre el ecuador. 97. El sistema GPS "triangula" para mostrar Preguntas conceptuales

las posiciones. Un satélite puede decir la distancia entre el satélite y el receptor, 1. Los átomos están ordenados en una sustancia cristalina, y dispuestos de ma-y dos tal vez la longitud, pero se necesitan tres para altitud, longitud y latitud.

nera aleatoria en las sustancias no cristalinas. 3. Una rebanada de pan opri-99. El diseño es bueno. La rotación proporcionaría una fuerza centrípeta sobre mida tiene un volumen reducido, la misma masa y una densidad aumentada.

los ocupantes. Espera este diseño en los futuros hábitats espaciales.

5. El estrecho empaquetamiento de los átomos en el iridio explica su gran

densidad. 7. Después de que un resorte se deforma, regresa a su forma inicial expuesta al oxígeno en el aire. El resultado es combustión muy rápida. 67. Un cuando se elimina la fuerza deformadora. 9. La ley de Hooke, F x, se edificio de departamentos tiene menos área por unidad habitable expuesta al cli-aplica a materiales elásticos. 11. El estiramiento será 3 veces mayor, o 6 cm.

ma que una unidad unifamiliar del mismo volumen. El área menor significa me-13. La capa neutra de una viga es la región donde no hay tensión ni com-nos pérdida de calor por unidad. (Es interesante ver las formas casi cúbicas de los prensión cuando se sostiene una carga; está en la porción media del haz.

edificios de departamentos en los climas septentrionales: un cubo tiene el área 15. Las largas losas horizontales de piedra se fracturan cuando soportan una superficial más pequeña para un sólido con lados rectangulares.) 69. La razón carga, de modo que las columnas verticales reducen las longitudes de las lo-del área (metros cuadrados) con respecto al volumen (metros cúbicos) dismisas. 17. No se necesita cemento porque las fuerzas de compresión mantienen nuye. 71. Hacerse ovillo implica exponer menos área de superficie al ambien-unido el arco. 19. La fuerza depende del área transversal. 21. El área su-te. 73. Más patata se expone al aceite cuando se rebana delgada que en pedazos perficial aumenta por cuatro; el volumen aumenta por ocho. 23. Un ratón más grandes. Por tanto, las patatas delgadas se cocinan más rápido que las grue-necesita más alimento por peso corporal que un elefante. 25. Las criaturas pesas. 75. Los mitones tienen una área superficial menor que los guantes. Quien-queñas tienen una área superficial más grande en relación con el peso corporal, quiera que haya fabricado mitones y guantes te dirá que, para hacer guantes, se y encuentran mayor resistencia del

aire en relación con el peso corporal, lo que requiere mucho más material. Las manos en los guantes se enfrían más rápido que resulta en una caída más lenta que la de las criaturas más grandes.

las manos en los mitones. Los dedos de las manos y los pies, y las orejas tienen Piensa y realiza

un área superficial desproporcionadamente grande con relación a otras partes del 27. Observa el área más pequeña con empaquetado estrecho. 29. La cadena cuerpo y en consecuencia son más proclives a congelación. 77. El ratón tiene tiene la forma del huevo. ¡Debes intentar esto!

un área superficial más grande en relación con el peso corporal, lo cual significa mayor resistencia del aire en relación con el peso corporal, lo cual significa que su Piensa y resuelve

rapidez terminal de caída es menor que la del gorila. 79. La superficie interior 31. Un metro cúbico de corcho tiene una masa de 400 kg y un peso de alrededor de los pulmones no es lisa sino con forma de esponja. Como resultado, hay una de 4,000 N. Su peso en libras es 400 kg 3 2.2 lb/kg 5 88 lb, demasiado pesado superficie enorme expuesta al aire que se respira. Ésta es una manera como la para levantarse. 33. Cuando los resortes se ordenan como en (a), cada resorte naturaleza compensa la reducción proporcional del área superficial en cuerpos soporta la mitad del peso, se estira la mitad (2 cm) y lee 5 N. En la posición grandes. De esta forma se recibe una cantidad suficiente de oxígeno vital para la (b), cada resorte soporte el peso completo, cada uno se estira 4 cm y cada uno lee vida. 81. Las gotas de lluvia grandes caen más rápido que las gotas de lluvia más 10 N. Ambos resortes se estiran 4 cm, de modo que el peso jala la combinación pequeñas, por la misma razón que los paracaidis tas más pesados caen más rápido una distancia total de 8 cm. 35. El doble de la masa de oro tendría el doble de que los paracaidistas más ligeros. Ambas cosas más grandes tienen un área superfi-volumen 2 cm3 L 3 L 3

= 2 cm = 1.26 cm.

cial más pequeña y, por tanto, menos resistencia del aire en relación con sus pesos.

Piensa y clasifica

Piensa y discute

37. C, A, B

83. La densidad tiene que ver no sólo con la masa de los átomos que constituyen Piensa y explica

un material, pero también con el tamaño de dichos átomos y su "amontonamien-39. Ambos toman lo mismo porque 1,000 mg 1 g. 41. El carbono y parte del to". Los átomos de iridio son más pequeños y se amontonan más estrechamente oxígeno que constituyen mucha de la masa de un árbol se originan en el CO

que los átomos de uranio, por lo que el metal iridio es más denso que el metal 2

del aire. 43. La evidencia de la estructura cristalina incluye patrones de difrac-uranio aun cuando los átomos de uranio sean más pesados. 85. Una soga el ción simétricos de varios materiales, micrografías como la que muestra el pro-doble de grueso tiene cuatro veces la sección transversal y, por tanto, es cuatro fesor Hubisz en la fotografía de inicio del capítulo, la forma tridimensional de veces más fuerte. La longitud de la soga no contribuye a su fuerza. (Recuerda el los materiales como el cuarzo, e incluso las perillas de latón de las puertas que refrán: una cadena sólo es tan fuerte como el más débil de sus eslabones, la fuerza se han marcado por el sudor de las manos. 45. Las densidades son las mismas de la cadena tiene que ver con el grosor de los eslabones, no con la longitud de la porque ambas son muestras de hierro. 47. La densidad de la ballena aumen-cadena.) 87. Conforme un organismo aumenta de tamaño, su área superficial ta. 49. El agua es más densa, de modo que un litro de agua tiene más masa que en relación con el tamaño creciente disminuye. Por tanto, un organismo grande, un litro de hielo. (Una vez que un litro de agua se congela, su volumen es mayor como un ser humano, debe tener un intestino de muchos pliegues para que el área que 1 litro.) 51. La parte superior del resorte soporta todo el peso del resorte y sea suficientemente grande como para digerir el alimento necesario. 89. Un se estira más que, por decir, el de en medio, que sostiene sólo la mitad del peso niño tiene más necesidad porque tiene un área superficial más grande por volu-y se estira la mitad. Las partes del resorte hacia la parte inferior sostienen muy men y en consecuencia pierde desproporcionadamente más agua al aire. 91. La poco del peso del resorte y difícilmente se estiran en absoluto. 53. El lado cón-idea del escalamiento (que una cantidad, como el área, cambia en forma diferente cavo está bajo compresión; el lado convexo está bajo tensión. 55. El concreto que otra cantidad, como el volumen) va más allá de la geometría. Las reglas que

también experimenta una compresión, pero no una tensión. De modo que la funcionan bien para un sistema de un tamaño pueden ser desastrosas cuando barra de acero debe estar en la parte de la losa que esté bajo tensión, la parte se aplican a un sistema con un tamaño diferente. Las reglas para gobernar una superior. 57. El diseño de la izquierda es mejor porque el peso del agua contra pequeña ciudad pueden no funcionar en absoluto para una ciudad grande. Otros el dique pone compresión sobre el dique. La compresión tiende a apretar entre sí ejemplos quedan a tu consideración. Ésta es una pregunta abierta que puede pro-las partes del dique, lo que añadió fuerza como la compresión sobre un arco. El vocar razonamiento o, mejor aún, discusión.

peso del agua pone tensión sobre el dique de la derecha, lo cual tiende a separar las partes del dique. 59. Escala una viga al doble de sus dimensiones lineales, viga Capítulo 13

I o de otro tipo, y será cuatro veces más gruesa. Entonces, a lo largo de su sección Preguntas conceptuales

transversal será cuatro veces más fuerte. Pero será ocho veces más pesada. Cuatro 1. Presión es fuerza por área. 3. La presión del líquido es proporcional a la veces la fuerza que soporta ocho veces el peso resulta en una viga sólo la mitad profundidad y a la densidad de peso. 5. Las presiones son las mismas a la misma de fuerte que la viga original. Lo mismo es cierto para un puente que se escala profundidad. 7. La fuerza de flotación actúa hacia arriba porque hay más fuerza por dos. El puente más largo sólo es la mitad de fuerte que el más pequeño. (El debajo de un objeto gracias a una mayor presión a mayor profundidad. 9. Am-diseño de los puentes más largos es distinto del de los pequeños. ¡Para eso se les bos volúmenes son iguales. 11. Un cuerpo sumergido está completamente in-paga a los arquitectos e ingenieros!) Es interesante, que una de las "dos nuevas merso, totalmente bajo la superficie. 13. El volumen del agua desplazada es ciencias" de Galileo, publicada en 1638, fuera la manera como la fuerza depende ½ L. La fuerza de flotación es de 5 N. 15. Cuando un objeto flota, su fuerza del tamaño. 61. Dado que cada eslabón de una cadena es jalado por sus eslabo-de flotación es igual a su peso. 17. se hunde; flota; ni se hunde ni flota 19.

nes vecinos, la tensión en la cadena que cuelga es exactamente paralela a la cadena No. En el caso de flotación, la fuerza de flotación es igual tanto al peso del objeto en cada punto a lo largo de la misma. Si el arco adopta la misma forma, entonces como al peso del agua desplazada. 21. Si la presión en una parte aumenta, el la

compresión a todo lo largo del arco será similar: paralela al arco en todo punto.

mismo aumento en presión se transmite a todas las partes. 23. Una esfera tiene No habrá fuerzas internas que tiendan a doblar el arco. Esta forma es una cate-el área superficial más pequeña para un volumen dado. 25. La adhesión es la naria, la forma de los arcos moder nos como el que adorna la ciudad de St. Louis.

atracción entre sustancias distintas; la cohesión es la atracción entre sustancias 63. El dulcero necesita hacer menos caramelo para las manzanas más grandes, parecidas.

porque el área superficial es menor por kilogramo. (Esto se aprecia con facilidad Piensa y realiza

si comparas las cáscaras del mismo número de kilogramos de manzanas pequeñas 27. Un huevo es más denso que el agua dulce, pero menos denso que el agua y grandes.) 65. El área superficial más grande del carbón en forma de polvo ase-salada. 29. La bola húmeda es jalada por la tensión superficial bajo la super-gura que una proporción mucho mayor de átomos de carbono en el carbón esté ficie cuando el sistema está ingrávido (se suelta). Cuando la lata hace impacto,

RESPUESTAS A PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR

S-13

la bola sumergida, que es mucho más ligera que el agua que desplaza, es lanzada estará parcialmente arriba de la superficie del mercurio. Por tanto, flota en mercu-con gran fuerza fuera del agua. 31. Los granos de pimienta flotan por la tensión rio. En agua se hundirá porque no puede desplazar su peso. 73. Una montaña superficial. Cuando la tensión superficial disminuye por la adición de jabón, los principalmente de plomo sería más densa que el manto de la Tierra y se hundiría granos se hunden. ¡Fascinante!

en él. Adivina dónde está la mayor parte del hierro en el mundo. ¡En el centro de Sustituye y listo

la Tierra! 75. Cuando el balón se mantiene bajo la superficie, desplaza un mayor 33. Presión 5 densidad de peso 3 profundidad 5 10,000 N/m3 3 1 m 5

peso de agua. 77. Los objetos pesados pueden hundirse o no,

dependiendo de 10,000 N/m2 5 10 kPa. 35. Presión 5 densidad de peso 3 profundidad sus densidades (por ejemplo, un tronco pesado flota mientras una roca pequeña 5 10,000 N/m3 3 220 m 5 2,200,000 N/m2 5 2,200 kPa.

se hunde, y un trasatlántico flota mientras que un clip se hunde). Las personas que dicen que los objetos pesados se hunden en realidad se refieren a que los obje-Piensa y resuelve

tos densos se hunden. Ten cuidado de distinguir entre cuán pesado es un objeto y 37. La fuerza por clavo es 120 libras/600 clavos 0.2 libras por clavo, bastante cuán denso es. 79. La fuerza de flotación permanecerá invariable sobre la roca que tolerable.

se hunde porque desplaza el mismo volumen y peso de agua a cualquier profundi-m 12 kg

39. Densidad =

=

= 6 kg/L.

dad. 81. Tú eres comprimible, mientras que una roca no lo es, de modo que cuan-V

2 L

do te sumerges, la presión del agua tiende a oprimir sobre ti y reduce tu volumen.

(Debido a que en 1 metro cúbico hay 1,000 litros, la densidad puede expresarse Esto aumenta tu densidad. (Ten cuidado cuando nades: en aguas poco profundas 6 kg 1,000 L

todavía puedes ser menos denso que el agua y flotar hacia la superficie sin esfuerzo, en unidades kg/m3.) Densidad

6,000 kg/m3

=

×

=

. Esto es seis veces

1 L

m3

pero a mayores profundidades puedes ser presionado hasta una densidad mayor la densidad del agua. 41. Sí. Primero encuentra la presión. Es densidad de peso que la del agua y tendrás que nadar hacia la superficie.) 83. La fuerza de flotación profundidad (10,000 N/m3)(2 m) 20,000 N/m2, o 20,000 Pa. Fuerza es

no cambia. La fuerza de flotación sobre un objeto que flota siempre es igual al peso presión área, y 1 cm2 104 m2, de modo que F (20,000 N/m2)(104 m2) de dicho objeto, sin importar cuál sea el fluido. 85. Cuando el cubo de hielo se 2 N. Sería más sencillo que el niño ejerciera esta fuerza. Es aproximadamente funde, el nivel del agua al lado del vaso no cambia (ignora efectos de temperatura).

el peso de una libreta o una pequeña caja de cereal. (Nota: En estos cálculos no Para ver esto, supón que el cubo de hielo es un cubo de 5 gramos; mientras flota, se consideró la presión del aire porque su efecto al empujar hacia abajo sobre el desplaza 5 gramos de agua. Pero cuando se funde, se convierte en los mismos 5 gra -

agua se cancela por su efecto al empujar desde afuera el agujero contra el agua que mos de agua. Por tanto, el nivel del agua no cambia. Lo mismo ocurre cuando se fuga.) 43. De acuerdo con la Tabla 12.1, la densidad del oro es 19.3 g/cm3.

se funde el cubo de hielo con las burbujas de aire. Ya sea que el cubo de hielo sea 1,000 g

hueco o sólido, desplaza tanta agua flotando como cuando se funde. Sin embargo, Tu oro tiene una masa de 1,000 gramos, de modo que =

= 19.3 g/cm3.

si el cubo de hielo contiene granos de arena pesada, al fundirse el nivel del agua V

1,000 g

en el borde del vaso se derrama. 87. Las góndolas pesan lo mismo porque están Al resolver V, se tiene V =

= 51.8 cm3. 45. La densidad humana

19.3 g/cm3

llenas hasta el borde, y cualquiera sea el peso de un bote que flota, el mismo peso de es aproximadamente la misma que la del agua, 1,000 kg/m3. A partir de densidad agua se desplaza cuando el bote entra a la góndola. 89. Si el agua no se desborda, la lectura en la báscula aumentará por el peso ordinario del pez. Sin embargo, si m/ V, se tiene V m/densidad (100 kg)/(1,000 kg/m3) 0.1 m3.

el acuario está lleno al borde, de modo que un volumen de agua igual al volumen del pez desborda, entonces la lectura no cambiará. Aquí se supone correctamente Piensa y clasifica

que el pez y el agua tienen la misma densidad. 91. Debido a la tensión superfi -

47. C, B, A

cial, que tiende a reducir al mínimo el área superficial de una masa informe de Piensa y explica

agua, su forma sin gravedad y otras fuerzas de distorsión es una esfera, la forma con 49. Agua. 51. La presión de la mujer es considerablemente mayor debido al área el área superficial más pequeña para un volumen dado. 93. Parte de cualquier de contacto relativamente pequeña del tacón, lo que te lastimaría más. 53. Hay presión que agregues al agua se transmite hacia los cocodrilos hambrientos vía el menos presión con una cama de agua debido a la mayor área de contacto. 55. Tu principio de Pascal. Si el agua estuviera confinada (esto es, no abierta a la atmós-cuerpo obtiene más reposo cuando te acuestas que cuando estás sentado o de pie fera) los cocodrilos recibirían cada pedacito de presión que ejercieras. Pero incluso porque el corazón no tiene que bombear sangre hasta las alturas que corresponden si pudieras deslizarte en el estanque y flotar calladamente sin ejercer presión con a las posiciones de pie o sentado. 57. Más agua fluirá de un grifo abierto en los las brazadas, tu desplazamiento de agua elevaría el nivel del agua en el estanque.

pisos inferiores debido a la mayor presión. Dado que la presión depende de la Este aumento tan ligero y el aumento tan ligero en la presión del fondo del estan-profundidad, un grifo en los pisos inferiores efectivamente está "más profundo"

que son señales siempre bienvenidas para los cocodrilos hambrientos. 95. En la que un grifo en los pisos superiores. La

presión en los pisos inferiores es mayor Figura 13.23, el aumento de presión en el depósito es resultado de la fuerza apli-por una cantidad densidad de peso profundidad, donde la profundidad es cada distribuida sobre el área del pistón de entrada. Este aumento en la presión se la distancia vertical entre grifos. 59. (a) El depósito está elevado de modo que transmite hacia el pistón de salida. Sin embargo, en la Figura 13.22, el aumento de produce una presión de agua adecuada en los grifos que atiende. (b) Los aros están presión lo proporciona la bomba mecánica, que no tiene nada que ver con el área más juntos en el fondo porque la presión del agua es mayor en el fondo. Más de la interfaz de fluido entre el aire comprimido y el líquido. Muchos dispositivos cerca de la parte superior, la presión del agua no es tan grande, de modo que ahí hidráulicos tienen un solo pistón sobre el cual se ejerce la presión. 97. Un clip se necesita menos refuerzo. 61. Un bloque de aluminio de 1 kilogramo es más más pesado empujaría más profundo en la superficie del agua, lo que superaría la grande que un bloque de plomo de 1 kilogramo. Por tanto, el aluminio desplaza fuerza pequeña de la tensión superficial, por lo cual se hundiría.

más agua. 63. Mientras más pequeña sea el área de la ventana, menor será la fuerza demoledora del agua sobre ella. 65. El agua que busca su propio nivel es consecuencia de la presión que depende de la profundidad. En un tubo en U

Piensa y discute

lleno con agua, por ejemplo, el agua de un lado del tubo tiende a empujar el agua 99. Se demuestra el concepto de presión. Marshall tiene cuidado de que los trozos hacia arriba en el otro lado hasta que las presiones a la misma profundidad en cada sean pequeños y numerosos de modo que su peso se aplique sobre un área de tubo son iguales. Si los niveles de agua no fueran iguales, habría más presión en un contacto grande. Entonces, el vidrio afilado ofrece presión insuficiente para cortar nivel dado en el tubo más lleno, lo que movería el agua hasta que los niveles fueran sus pies. 101. Desde un punto de vista físico, el evento fue bastante razona-iguales. 67. La fuerza de flotación es el resultado de diferencias en la presión; si ble porque la fuerza del océano sobre su dedo habría sido muy pequeña. Esto es no hay diferencias de presión, no hay fuerza de flotación. Esto puede ilustrarse con así porque la presión sobre su dedo tiene que ver sólo con la profundidad del agua, el siguiente ejemplo. Una pelota de ping-pong que se empuja bajo la superficie del específicamente la distancia a la que se encuentra la fuga abajo del nivel del mar, agua usualmente flotará de vuelta hacia la superficie

cuando se suelte. Sin embargo, no con el peso del océano. Para un ejemplo numérico, consulta el Piensa y resuelve si el recipiente de agua está en caída libre, una pelota de ping-pong sumergida 41. 103. Usar una manguera de jardín llena de agua como un indicador de ele-caerá con el recipiente y no intentará alcanzar la superficie. En este caso no hay vación es un ejemplo práctico del agua que busca su propio nivel. La superficie del fuerza de flotación que actúe sobre la bola porque no hay diferencias de presión: agua en un extremo de la manguera estará a la misma elevación por arriba del ni -

los efectos locales de la gravedad están ausentes. 69. Un cuerpo flota más alto en vel del mar que la superficie del agua en el otro extremo de la mangue-un fluido más denso porque no tiene que hundirse tanto para desplazar un peso ra. 105. Cuando un barco está vacío, su peso es mínimo y desplaza el mínimo de de fluido igual a su propio peso. Un volumen más pequeño del fluido más den-agua y flota más alto. Transportar cualquier carga aumenta su peso y lo hace flotar so puede coincidir con el peso del cuerpo en flotación. 71. El mercurio es más más bajo. Un barco flotará igual de bajo si transporta algunas toneladas de espuma denso (13.6 g/cm3) que el hierro. Un bloque de hierro desplazará su peso y todavía de estireno que si transporta el mismo número de toneladas de hierro. De modo

que el barco flota más bajo en el agua cuando está cargado con espuma de esti -

F

5 N

43. A partir de P = ; F = PA = (0.04)10

(100 m2) = 4 ×105 N.

reno que cuando está vacío. Si la espuma de estireno estuviera afuera del barco, por A

m2

abajo de la línea de flotación, entonces el barco flotaría más alto, como lo haría una Piensa y clasifica

persona con un chaleco salvavidas. 107. El nivel del agua cae. Esto se debe a que 45. A, B, C 47. C, A, B

el hierro desplaza una mayor cantidad de agua mientras está sostenido que cuando Piensa y explica

está sumergido. Un objeto que flota desplaza su peso de agua, que es mayor que 49. No hay atmósfera en la Luna porque la rapidez de una fracción mensurable de su propio volumen, mientras que un objeto sumergido desplaza sólo su volumen.

moléculas de gas a temperaturas ordinarias excedería la velocidad de escape lunar (Esto puede ilustrarse en la cocina con un plato que flota en un fregadero lleno de (debido a la menor gravedad de la Luna). Toda cantidad apreciable de gas se ha agua. La cubertería en el plato toma el lugar de la limadura de hierro. Observa el fugado hace tiempo y ha dejado a la Luna sin aire. 51. Si el diámetro se duplica-nivel del agua al lado del fregadero y luego lanza por la borda la cubertería. El plato ra, el área sería cuatro veces mayor. Para la misma presión, esto significaría cuatro flotará más alto y el nivel del agua en el lado del fregadero descenderá. ¿El volumen veces más fuerza. 53. Las crestas cerca de la base del embudo permiten que el aire de la cubertería desplazará suficiente agua para llevar el agua a su punto de partida?

escape del recipiente donde se inserta. Sin las crestas, el aire en el recipiente se com-No, no en tanto sea más densa que el agua.) 109. El globo se hundirá hasta el primiría y tendería a evitar el llenado conforme suba el nivel del líquido. 55. La fondo porque su densidad aumenta con la profundidad. El globo es compresible, masa de la burbuja no cambia. Su volumen aumenta porque su presión disminuye de modo que el aumento en presión del agua abajo de la superficie lo comprime (ley de Boyle) y su densidad disminuye (misma masa, mayor volumen). 57. A y reduce su volumen, lo que en consecuencia aumenta su densidad. Su densidad diferencia del agua, el aire se comprime con facilidad. De hecho, su densidad es aumenta aún más conforme se hunde más bajo, hacia regiones de mayor presión proporcional a su presión (a una temperatura dada). De este modo, cerca del suelo, y compresión. Piensa en la fuerza de flotación: a medida que su volumen se redu-donde la presión es mayor, la densidad del aire es mayor y corresponde a ladrillos ce al aumentar la presión conforme desciende, la cantidad de agua que desplaza más comprimidos. A gran altitud, donde la presión es más baja, la densidad del aire se vuelve menor. De modo que su fuerza de flotación disminuye a medida que es menor, lo que corresponde a

ladrillos menos comprimidos. 59. Una bomba de desciende. 111. Sí, dice la verdad. ¡Pero lo que no te dice es que te ahogarás! Tu vacío perfecto podría bombear agua a una altura no mayor de 10.3 m. Esto es así chaleco salvavidas se sumergirá y desplazará más agua que la de tus amigos quienes porque la presión atmosférica que empuja el agua hacia arriba del tubo pesa tanto flotan en la superficie. Aunque la fuerza de flotación sobre ti será mayor, ¡tu peso como 10.3 metros verticales de agua con la misma área transversal. 61. La altura aumentado todavía es mayor! Si te hundes o flotas dependerá de si la fuerza de de la columna en un barómetro de mercurio está determinada por la presión, no flotación es o no igual a tu peso. 113. En ausencia de peso no ocurriría flota-por la fuerza. Las presiones de fluido dependen de la densidad y la profundidad: la ción. La flotación depende de las diferencias de presión debidas a diferentes pesos presión en el fondo de una ancha columna de mercurio no es diferente de la que de agua bajo diferentes profundidades de agua. Si no hay diferencias de presión, hay en el fondo de una columna angosta de mercurio con la misma profundidad.

no hay flotación. En la EEI, la tensión superficial, más que la flotación, dictan el El peso del fluido por área de contacto es la misma para cada uno. Lo mismo su-comportamiento de los objetos sumergidos.

cede con el aire circundante, lo cual explica por qué los barómetros de tubo ancho muestran la misma altura que los barómetros de tubo angosto. 63. La altura sería Capítulo 14

menor. El peso de la columna equilibra el peso de una columna de aire de igual Preguntas conceptuales

área. El líquido más denso necesitaría menos altura para tener el mismo peso que la 1. El Sol es la fuente de energía para el movimiento de las moléculas del aire. La columna de mercurio. 65. Los pulmones de uno, al igual que un globo inflado, gravedad de la Tierra jala las moléculas de aire hacia abajo, lo que evita que la ma-se comprimen cuando se sumergen en agua, y el aire en su interior se comprime.

yoría escape hacia el espacio. 3. La causa de la presión atmosférica es el peso El aire no fluirá por sí solo de una región de menor presión a una región de mayor del aire. 5. La masa aproximada es de 1 kg, con un peso de 10 N. 7. Ambas presión. El diafragma en el cuerpo reduce la presión pulmonar para permitir la presiones son iguales. 9.

Tendría que ser más alto, porque es 1/13.6 más den-respiración, pero este límite se lleva a un esfuerzo extremo cuando una persona se so. 11. La atmósfera puede empujar el agua un máximo de 10.3 m por medio sumerge casi 1 m bajo la superficie del agua. Se supera a más de 1 m. 67. El plo-de su presión. 13. La densidad se duplica cuando el volumen se reduce a la mi-mo y las plumas tienen la misma masa. El peso se mide como la fuerza con la cual tad. 15. Un gas ideal es aquel en el cual las fuerzas intermoleculares y los tama- algo presiona sobre una superficie de apoyo. Cuando la flotabilidad del aire influye, ños de las moléculas pueden ignorarse. 17. Existe una fuerza de flotación para la fuerza neta contra la superficie de apoyo es menor, lo que indica un peso menor.

todos los objetos que desplazan un fluido. 19. Las líneas de corriente son líneas La fuerza de flotación es más apreciable para volúmenes más grandes, como las plu -

imaginarias que muestran la trayectoria de un fluido. 21. Cuando aumenta la mas. De modo que, con menos flotabilidad, la misma masa de plomo pesa más rapidez, disminuye la presión interna. 23. El principio de Bernoulli trata con que la misma masa de plumas. 69. El helio es menos denso que el aire y pesaría presiones internas. 25. El agua con movimiento más rápido entre los barcos menos que un volumen igual de aire. Una botella llena de helio pesaría menos que resulta en una presión reducida. 27. El fluido es empujado hacia arriba por la una botella de aire (si supones que están llenas a la misma presión). Sin embargo, presión de la atmósfera sobre su superficie. 29. Tres ejemplos son: las señales de la botella llena de helio pesaría más que la botella vacía. 71. Un objeto se eleva neón, las lámparas fluorescentes y ciertas pantallas de televisión.

en el aire sólo cuando la fuerza de flotación supera su peso. Un tanque de acero Piensa y realiza

lleno de cualquier cosa pesa más que el aire que desplaza, de modo que no se eleva.

31. Las presiones deben ser aproximadamente iguales. Las paredes rígidas del neu-Además, el helio está comprimido en el tanque y no se elevaría aún cuando el peso mático impiden que los cálculos de presión sean más exactos. En consecuencia, del tanque fuera cero. Un globo lleno de helio pesa menos que el aire que desplaza el valor calculado debe ser un poco mayor. 33. Tienes una especie de baróme-y se eleva. 73. De acuerdo con la ley de Boyle, la presión aumenta a tres veces su tro, pero, debido a que el medio es agua,

tendría que alcanzar una columna de presión original. 75. La presión aumenta, en concordancia con la ley de Boyle.

10.3 m de alto para proporcionar la misma presión que una columna de mercurio 77. La forma es la de una catenaria, como el Arco Gateway en St. Louis y la cadena de 75 cm de alto. 35. El borboteo se debe al aire que entra al frasco. No ocurriría colgante discutida en el Capítulo 12. 79. La fuerza de la atmósfera en ambos borboteo si esto de algún modo se intentara en la Luna, donde no hay atmósfe-lados de la ventana; la fuerza neta es cero, de modo que las ventanas no suelen rom-ra. 37. Cuando tu dedo cierra la parte superior de la pajilla llena de agua, la pre-perse bajo el peso de la atmósfera. Sin embargo, en un viento fuerte, la presión se sión atmosférica ya no actúa sobre la parte superior del agua, por lo que se levanta reducirá sobre el lado de la ventana en que sopla el viento (principio de Bernoulli) con facilidad. Cuando quitas el dedo, el agua se derrama hacia el fondo. Éste es un y las fuerzas ya no se cancelarán. Muchas ventanas son sopladas hacia afuera en los buen procedimiento para transferir líquidos de un tubo de ensayo a otro. 39. La vientos fuertes. 81. Conforme la rapidez del agua aumenta, la presión interna presión del agua es menor en la parte que fluye sobre la parte curva de la cuchara, dentro del agua disminuye. 83. El aire se mueve más rápido sobre la parte supe-lo que resulta en que dicha parte se mueva hacia el chorro en lugar de alejarse de él.

rior que gira del frisbee, y la presión contra la parte superior se reduce. Un frisbee, al igual que una ala, necesita un "ángulo de ataque" para garantizar que el aire que Piensa y resuelve

fluye por arriba siga una trayectoria más larga que el aire que fluye bajo él. De 41. Para elevar efectivamente (0.25)(80 kg) 20 kg, la masa de aire desplazado modo que hay una diferencia de presiones contra las partes superior e inferior del sería de 20 kg. La densidad del aire es aproximadamente 1.2 kg/m3. A partir de frisbee que produce una sustentación ascendente. 85. Los espaciamientos de las densidad masa/volumen, el volumen de 20 kg de aire, además el volumen del líneas de corriente en lados opuestos de una pelota que no gira son iguales. Para una globo (ignorando la masa del helio), sería volumen masa/densidad (20 kg)/

pelota que gira, las líneas de corriente están más juntas en el lado donde la rapidez (1.2 kg/m3) 17 m3. (Desde luego, conforme aumenta la altitud, el helio en el del aire aumenta por la acción del giro. 87. Una mayor área de ala produce una globo se expande, lo que desplaza mayor volumen de aire, pero aire más delgado, mayor

sustentación, lo cual es importante a rapideces bajas, cuando de otro modo ya que la atmósfera también se vuelve menos densa.)

la sustentación sería menor. Los alerones se retraen para reducir el área a rapidez de

RESPUESTAS A PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR

S-15

crucero, donde un área de ala menor puede proporcionar sustentación igual al peso microscópico" hace al agua menos densa. 29. El volumen mínimo del agua (y de la aeronave. 89. El aire más delgado en los aeropuertos de gran altitud pro-el menos denso) ocurre cuando el agua está a 4C.

duce menos sustentación para los aviones. Esto significa que los aviones necesitan pistas más largas a fin de lograr mayor rapidez para el despegue. 91. El principio Piensa y realiza

de Bernoulli es la base. Para el automóvil en movimiento, la presión es menor en 31. Si usas un cacahuate de 0.6 gramos, tu valor debe ser de alrededor de 1,400 ca-el lado del automóvil donde el aire se mueve más rápido: el lado más cercano al lorías, si supones que toda la energía térmica se fue hacia el agua.

camión, lo que resulta en que el automóvil es empujado por la atmósfera hacia Sustituye y listo

el camión. Dentro del convertible, la presión atmosférica es mayor que afuera, y el 33. Q 5 cm D T 5 (1 cal/g·8C)(300 g)(308C 2 228C) 5 3,000 cal.

techo de lona se empuja hacia arriba, hacia la región de menos presión. Lo mismo 35. 3,000 cal(4.19 J/1 cal) 5 12,570 J

ocurre con las ventanas del tren, donde el aire interior está en reposo con relación a Piensa y resuelve

la ventana y el aire exterior está en movimiento. La presión del aire contra la super-37. Cada kg requiere 1 kcal por cada grado de cambio, de modo que 50 kg neficie interior de la ventana es mayor que la presión atmosférica exterior. Cuando la cesitan 50 kcal por cada grado de cambio. Veinte grados significan 20 50 kcal, diferencia de presiones es suficientemente grande, la ventana revienta.

que es 1,000 kcal. Por la fórmula, Q cm T (1 cal/gC)(50,000 g) (20C) 1,000 kcal. Puedes convertir esto a joules sabiendo que 4.19 J 1 cal. En joules Piensa y discute

esta cantidad de calor es 4,190 kJ (alrededor de 4,200 kJ). 39. Si una barra de 93. El peso de un camión se distribuye sobre la parte de los neumáticos que hace 1 m de largo se expande 0.6 cm cuando se calienta, entonces una barra del mismo contacto con el camino. Peso/área superficial presión, de modo que mientras material que sea 100 veces más larga se expandirá 100 veces más: 0.6 cm por cada más grande sea el área superficial, o de manera equivalente, mientras mayor sea metro, o 60 cm. (La barra calentada medirá 100.6 m de largo.) 41. Si una tubería el número de neumáticos, mayor puede ser el peso del camión para una presión de acero que se ajustara de forma ceñida alrededor del mundo se calentara 1 C, ¡se dada. ¿Cuál presión? La presión ejercida por los neumáticos sobre el camino, lo sostendría a más o menos 70 m sobre el suelo! La forma más directa de ver esto que se determina por (pero es un poco mayor que) la presión del aire en sus neu-es considerar el radio de la tubería de 40,000 kilómetros de largo, que es el radio máticos. ¿Puedes ver cómo se relaciona esto con el Piensa y realiza 31? 95. Si el de la Tierra, 6,370 kilómetros. El acero se expandirá 11 partes en un millón por producto está sellado en un empaque hermético a nivel del mar, entonces la pre-cada C de aumento en temperatura; el radio, así como la circunferencia, se ex-sión en el empaque es de aproximadamente 1 atmósfera. La presión de la cabina pandirán por esta fracción. De este modo, 11 millonésimas de 6,370 km = 70 m.

se reduce un poco en vuelos a gran altura, de modo que la presión en el empaque

¿No es sorprendente?

es mayor que la presión circundante y, por tanto, el empaque revienta. 97. Es-Piensa y clasifica

tás de acuerdo con tu amigo porque el elefante desplaza mucho más aire que un 43. C, A, B 45. C, A, B

pequeño globo lleno de helio, o cualquier cosa pequeña. Sin embargo, los efectos de las fuerzas de flotación son otra historia. La gran fuerza de flotación sobre el Piensa y explica

elefante es insignificante en relación con su enorme peso. Sin embargo, la peque-47. Dado que los grados Celsius son más grandes

que los grados Fahrenheit, un ña fuerza de flotación que actúa sobre el globo de poco peso es significativa. 99.

aumento de 1C es más grande; es 9/5 más grande. 49. Las moléculas de gas se Las lecturas no difieren, si supones que el aire no está comprimido. La bolsa llena mueven de manera desordenada y con rapideces aleatorias. Continuamente corren de aire es más pesada, pero su flotabilidad se invalida por el peso adicional y la unas hacia otras, en ocasiones cediendo energía cinética a las vecinas y en ocasiones lectura es la misma. La fuerza de flotación es igual al peso del aire desplazado, recibiendo energía cinética. En esta interacción continua sería estadísticamente que es lo mismo que el peso del aire dentro de la bolsa (si las presiones son imposible para cualquier número grande de moléculas tener la misma rapidez.

iguales). 101. El globo que es libre de expandirse desplazará más aire conforme La temperatura tiene que ver con rapideces promedio. 51. Una molécula en un se eleva que el globo rígido. Por tanto, el globo que tiene libertad para expan -

gramo de vapor tiene mucho más energía cinética, como lo demuestra su tempera-dirse experimentará mayor fuerza de flotación que el globo que no se expande, y tura más alta. 53. El mercurio debe expandirse más que el vidrio. Si las tasas de se elevará más alto. Además, conforme el globo rígido se eleva, su volumen cons- expansión fuesen iguales no habría diferentes lecturas para diferentes temperaturas.

tante desplaza volúmenes de aire cada vez más ligeros. 103. El hábitat giratorio Todas las temperaturas tendrían la misma lectura. 55. La rapidez promedio de es una centrífuga, y aire más denso se "lanza" hacia la pared exterior. Tal como en las moléculas en ambos recipientes es la misma. Hay mayor energía interna en el la Tierra, la densidad máxima del aire está "a nivel del suelo" y se vuelve menor vaso lleno (doble de materia a la misma temperatura). Más calor se requerirá para con la altitud creciente (distancia hacia el centro). La densidad del aire en el hábi-aumentar la temperatura del vaso lleno en 1C; de hecho, el doble. 57. Aumento tat giratorio es menor en la región de g cero, el centro. 105. De acuerdo con el de temperatura significa aumento de energía cinética, lo cual significa aumento de principio de Bernoulli, cuando un fluido gana rapidez al fluir por una región estre -

la cantidad de movimiento de las moléculas. Dicho de manera simple: conforme la cha, la presión del fluido se reduce. La ganancia

en rapidez, la causa, produce temperatura de un gas confinado aumenta, las moléculas se mueven más rápido presión reducida, el efecto. Pero uno puede argumentar que una presión reducida y ejercen mayor presión cuando rebotan de las paredes del recipiente. 59. La en un fluido, la causa, producirá un flujo en la dirección de la presión reducida, el sustancia con menor capacidad calorífica específica, el hierro, experimenta ma-efecto. Por ejemplo, si reduces la presión del aire en una tubería con una bomba yor cambio en temperatura. 61. Menos calor específico significa menos tiempo o cualquier otro medio, el aire vecino correrá hacia la región de presión reducida.

para un cambio de temperatura, y un baño caliente más corto. 63. Alcohol, En este caso el aumento en rapidez del aire es el resultado, no la causa, de la porque menos calor específico significa menos inercia térmica y mayor cambio en presión reducida. Causa y efecto están abiertos a interpretación. ¡El principio de la temperatura. 65. El ladrillo se enfriará más rápido y tendrás frío en medio Bernoulli es un tema controvertido para muchos físicos!

de la noche. Lleva a la cama una bolsa de agua caliente con su mayor calor específico y estarás caliente toda la noche. 67. El clima de Islandia es moderado por el agua Capítulo 15

circundante. (El calor debido a la corriente del Golfo también ayuda.) 69. Con-Preguntas conceptuales

forme el océano en la costa de San Francisco se enfría en el invierno, el calor que 1. El agua se congela a 0C y 32F, y hierve a 100C y 212F. 3. La energía pierde (transfiere) calienta la atmósfera con la que tiene contacto. Este aire caliente cinética traslacional es la energía del movimiento molecular de ida y vuelta. 5.

sopla sobre la línea costera de California y produce un clima relativamente cálido.

La condición necesaria es el equilibrio térmico; sólo entonces el termómetro y la Si los vientos provinieran del este en lugar del oeste, el clima de San Fran cisco cosa que se miden tendrán la misma temperatura. 7. La energía fluye desde los se enfriaría por los vientos invernales del frío y seco estado de Nevada. El clima se objetos más calientes a los objetos más fríos. 9. El calor es energía interna que invertiría también en Washington, DC, porque el aire calentado por el enfria-fluye de las ubicaciones calientes a las frías. No son dos términos para la misma miento del Océano Atlántico soplaría sobre

Washington, DC, y produciría un cosa. 11. Se quema el alimento y luego se mide la energía liberada. 13. Una clima más cálido en invierno. 71. El agua entre 0 y 4C es una excepción. 73.

caloría es equivalente a 4.19 joules. 15. La plata se calienta más rápido y por Cuando los remaches se enfrían se contraen. Esto aprieta las placas a unir.

tanto tiene menor capacidad calorífica específica. 17. Una sustancia que se 75. Los neumáticos se calientan, lo cual calienta el aire en su interior. Las molécu-enfría rápidamente tiene una baja capacidad calorífica específica. 19. En la colas en el aire calentado se mueven más rápido, lo cual aumenta la presión del aire en rriente del Golfo se transporta energía interna, de las aguas tropicales al Atlántico los neumáticos. (Consulta la pregunta 57.) 77. Enfría el vaso interior y calienta norte, donde calienta el clima frío. 21. El agua tiene un efecto moderador: lenta el vaso exterior. Si lo haces al revés, los vasos se pegarán más firmemente (si no es para calentarse y lenta para enfriarse. 23. La tira se dobla porque sus dos me-que se rompen). 79. Si se expandieran de manera diferente, como sucede con tales tienen diferentes tasas de expansión térmica. 25. El agua de hielo se con-materiales distintos, la llave y la cerradura no coincidirían. 81. Es probable que trae con el aumento de temperatura, hasta que alcanza 4C. 27. El "aguanieve la fotografía se haya tomado en un día cálido. Si se hubiera tomado en un día frío,

habría más espacio entre los segmentos. 83. El desbordamiento es el resultado de calor del suelo y el objeto puede enfriarse mediante radiación hasta temperaturas la gasolina líquida que se expande más que el tanque sólido. 85. La forma en U

por de bajo de la temperatura del aire circundante. 25. Sí. La ley de enfriamien-absorbe el exceso de expansión o contracción, sin cambiar las posiciones de los punto de Newton también se aplica al calentamiento. 27. El vidrio permite entrar tos finales. 87. En la construcción de una bombilla, es importante que los con -

energía radiante de luz visible con frecuencia alta, pero evita que salga energía ductores metálicos y el vidrio tengan la misma tasa de expansión térmica. Si los infrarroja de frecuencia baja vuelta a

radiar. Lo mismo ocurre para la atmósfera que conductores metálicos se expanden más que el vidrio, el vidrio puede romperse. Si actúa como válvula de una vía. 29. El Sol vierte 1,400 J de energía radiante por el metal se expande menos que el vidrio al calentarse, entraría aire por las brechas segundo por metro cuadrado a la parte superior de la atmósfera terrestre.

resultantes. 89. El agua tiene la densidad más alta a 4C; por tanto, enfriarse o Piensa y realiza

calentarse a esta temperatura resultará en una expansión del agua. Un pequeño 31. Esta actividad muestra muy bien que el metal es un buen conductor del calor.

aumento en el nivel del agua sería ambiguo y haría impráctico un termómetro de Si pones sólo el papel en la flama, alcanza con facilidad la temperatura de ignición agua en esta región de temperatura. 91. El volumen aumenta. 93. Es impor-y se enciende. Pero esta temperatura de ignición no se alcanza si el papel se enrolla tante evitar que el agua se congele en las tuberías porque, cuando la temperatura en una barra metálica gruesa que absorbe energía de la flama, y que, por tanto, desciende por debajo de la congelación, el agua se expande cuando se congela y las no absorbe el papel. 33. Cuéntale a la abuela cómo las nubes vuelven a radiar la tuberías (si son de metal) se fracturarán si el agua que contienen se congela. 95.

energía terrestre de vuelta a la superficie de la Tierra. Abundan ejemplos de todos Si el enfriamiento ocurriera en el fondo de un estanque, todavía se formaría hielo los objetos que emiten y absorben energía.

en la superficie, pero transcurriría mucho más tiempo para que el estanque se congelara. Esto se debe a que toda el agua en el estanque tendría que reducirse a Sustituye y listo

una temperatura de 0C en lugar de 4C antes de formarse el primer hielo. El hielo 35. Q 5 cm D T 5 (1 cal/g·8C)(20 g)(908C 2 308C) 5 1,200 cal.

que se formara en el fondo, donde ocurre el proceso de enfriamiento, sería me-Piensa y resuelve

nos denso y flotaría hacia la superficie (excepto por el hielo que pudiera formarse 37. El café disminuye 25C en temperatura en 8 horas. La ley de enfriamiento alrededor de material anclado al fondo del estanque).

de Newton indica que su tasa de enfriamiento es proporcional a la diferencia de Piensa y discute

temperatura. Entonces, cuando la diferencia de temperatura es de la mitad, la tasa 97. Sin considerar otros efectos, la temperatura debe ser un poco más alta en el de enfriamiento será de la mitad. Por tanto, el café perderá 12.5 grados en otras fondo porque la EP del agua arriba se transforma en EC abajo, que a su vez se 8 horas, la mitad que en las primeras 8 horas, y se enfriará de 50C a 37.5C.

transforma en calor y energía interna cuando el agua que cae se detiene. (En su luna 39. (a) Q ganado por agua = Q perdido por clavos, de modo que (cm D T)agua 5

de miel, James Prescott Joule no podía alejarse de su preocupación por el calor e (cm D T)clavos: (1.0 g·8C)(100 g)(T 2 208C) 5 (0.11 cal/g·8C)(100 g)(408 2 T), intentó medir la temperatura del agua arriba y abajo de una cascada en Chamonix.

donde T 5 228C. (b) Aunque las masas son iguales, los calores específicos están Sin embargo, el aumento de temperatura que él esperaba fue compensado por el muy separados; el del hierro es muy bajo y el del agua es increíblemente alto. Se enfriamiento debido a evaporación a medida que el agua caía.) 99. Todas las par-necesita todo el calor que el hierro pueda liberar para elevar el agua unos 28C.

tes de un anillo metálico se expanden cuando se calienta, no sólo el grosor, sino Piensa y explica

también las circunferencias exterior e interior. Por tanto, la bola que suele pasar 41. Las plumas (y el aire que atrapan) son buenos aislantes y por tanto condu-por el agujero cuando las temperaturas son iguales pasará con más facilidad por el cen el calor corporal muy lentamente hacia los alrededores. 43. El aire a 70F

agujero expandido cuando el anillo se caliente. (Es muy interesante que el agujero se se siente cómodo principalmente porque es un mal conductor. La piel más caliente expanda tanto como un disco del mismo metal que experimenta el mismo aumento es lenta para transferir calor al aire. Sin embargo, el agua es un mejor conductor de de temperatura. Para montar los anillos metálicos en las ruedas de madera de los calor que el aire, de modo que los cuerpos más calientes transfieren calor más carruajes, los herreros calentaban primero los bordes. Al enfriarse, la contracción re-fácilmente al

agua. 45. La energía "fluye" de la temperatura más alta a la sultaba en un ajuste ceñido.) 101. El latón se expande y contrae más que el hierro más baja, de tu mano al hielo. Es la energía, el calor, que fluye de tu mano para los mismos cambios en temperatura. Una vez que el hierro se enfría y adquiere lo que produce la sensación de frío. No hay flujo de lo frío a lo caliente; sólo su "agarre férreo" sobre el latón, los dos materiales, al ser buenos conductores y estar de lo caliente a lo frío. 47. Si tocas con la lengua un metal muy frío, puede en contacto mutuo, se calentarán o enfriarán juntos. Si la temperatura aumenta, el conducirse y eliminarse rápido tanto calor de tu lengua que lleve a la saliva a hierro se expande, pero el latón se expande todavía más. Ni siquiera enfriándolos una temperatura por debajo de cero, donde se congela, lo que pegará la lengua será posible separarlos. 103. En un día caluroso una cinta de acero se expandi-al metal. En el caso de la madera que es relativamente no conductora, mucho rá más que el suelo. Medirás terreno con una cinta "estirada". De modo que tus menos calor se conduce de la lengua y la congelación no sucede con suficiente mediciones de un pedazo de terreno serán menores que las mediciones hechas en rapidez como para que se pegue de modo súbito. 49. Hay más espacios de un día frío. Las mediciones hechas en un día frío mostrarán que el área es más gran-aire en los mitones que en los guantes, lo cual calienta más las manos. Además, de. (Si, por otro lado, estás demarcando terreno todavía no lotificado, entonces en los dedos dentro de los mitones están juntos, lo que mantiene las manos más un día caliente obtendrás más tierra.) 105. El volumen combinado de todos los calientes. 51. La conductividad de la madera es relativamente baja cualquie-miles de millones de "cuartos abiertos" en los cristales de hielo hexagonales de un ra que sea la temperatura, incluso en la etapa de carbones al rojo vivo. Pue-trozo de hielo es igual al volumen de la parte de hielo que se extiende por arriba del des caminar descalzo con seguridad sobre carbones de madera al rojo vivo si agua cuando el hielo flota. Cuando el hielo se funde, los espacios abiertos se llenan pisas rápidamente, porque muy poco calor se conduce a tus pies. Debido a la con la cantidad de hielo que se extiende por arriba del nivel del agua. Es por esto mala conductividad de los carbones, la energía del interior de los carbones no por lo que el nivel del agua no se eleva cuando el hielo en un vaso de agua se funde: susti tuye con facilidad la energía que transfiere hacia tus pies. Esto es evidente el hielo fundido se "hunde" y llena muy bien los espacios abiertos.

en el color rojo disminuido de los carbones después de haberlos pisado. Sin embargo, caminar sobre carbones de hierro al rojo vivo

es otra historia. ¡Esto sería Capítulo 16

un resonante ay! 53. La temperatura estará en medio, porque uno disminuye Preguntas conceptuales

en temperatura y el otro aumenta en temperatura. 55. Es correcto decir que el 1. Los electrones "libres" se mueven rápido y transfieren energía a otros electrones aumento en energía térmica de un objeto es igual a la reducción en energía térmica que migran a través del material. 3. La madera es un buen aislante incluso cuando del otro, no la temperatura. El enunciado es correcto cuando los objetos caliente está al rojo vivo; por tanto, muy poca energía térmica se transfiere hacia los pies. 5.

y tibio son del mismo material y de la misma masa. 57. Las moléculas de gas El aislamiento demora la transferencia de calor. 7. Cuando la molécula de con menos masa tienen mayores rapideces promedio. Un vistazo a la tabla perió-aire es golpeada por una molécula con movimiento rápido, aumenta su rapidez dica muestra que el argón (A 18) tiene átomos menos masivos que el criptón de rebote. 9. Las rapideces disminuyen con la expansión. 11. La dirección de (A 36). Los átomos más rápidos son los del argón. Éste es el caso ya sea que los los vientos cambia con los cambios de temperatura de la tierra y el agua. El flujo gases estén o no en recipientes separados. 59. Las moléculas más rápidas con de aire se invierte a medida que se invierten las temperaturas relativas. 13. Las U-235 se difundirán más rápido que las moléculas más lentas con U-238 más ondas con frecuencia alta tienen longitudes de onda cortas. 15. La radiación pesado. 61. El humo, como el aire caliente, es menos denso que los alrededo -

terrestre es radiación emitida por la superficie de la Tierra. 17. Las temperaturas res y flota. Se enfría cuando hace contacto con el aire circundante y se vuelve más no disminuyen de manera continua porque todos los objetos también absorben denso. Cuando su densidad coincide con la del aire circundante, su flotabilidad energía radiante. 19. Una cazuela negra se calentará más rápido (y se enfriará y su peso se equilibran y se detiene el ascenso. 63. Tanto la molécula como la más rápido) que una cazuela de plata. 21. La pupila parece negra porque la luz pelota de béisbol están bajo la influencia de la gravedad y ambas acelerarán hacia que entra en el ojo por lo general no sale. Sin embargo, con los flashes de las abajo a g. Cuando otras moléculas impiden la caída, la aceleración de caída libre g cámaras, algo de ella sale. 23. Una mala conductividad significa que hay poco ya no se mantiene. 65. Debido al alto calor

específico del agua, la luz solar

RESPUESTAS A PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR

S-17

calienta el agua mucho menos de lo que calienta la tierra. Como resultado, el aire agua en ebullición a la misma temperatura. 9. La humedad es una medida de se calienta sobre la tierra y se eleva. El aire más frío proveniente de arriba del agua cuánto vapor de agua hay en el aire. La humedad relativa es la razón de cuánta fría toma su lugar y se forman corrientes de convección. Si la tierra y el agua se agua hay en el aire con respecto a la mayor cantidad de vapor de agua que puede calentaran igualmente por el Sol, no se establecerían dichas corrientes de convec-contener el aire a una temperatura dada. 11. Conforme el aire se eleva, se enfría ción (ni los vientos que producen). 67. No. Sin embargo, los ventiladores de y condensa para formar nubes. 13. Cuando la evaporación ocurre debajo de techo pueden crear un efecto de "viento frío" que puede hacerte sentir hasta cin-la superficie de un líquido, se dice que hierve. 15. La temperatura más alta, co grados más frío. Los ventiladores de techo no reducen la temperatura en la ha-no la ebullición, cocina los alimentos más rápido. 17. Cuando el agua arriba bitación, sino simplemente circulan aire, lo que te hace sentir más frío. 69. La burbujea, la presión en el fondo se reduce, y entonces el agua hierve. 19. El mezcla se expande cuando se expulsa desde la boquilla y, por tanto, se enfría. A punto de ebullición del agua se reduce cuando la presión del aire de arriba se la temperatura de congelación de 0C, se forma hielo. 71. Un buen emisor, en reduce. 21. Aumentar la temperatura significa aumentar el movimiento, lo que virtud del diseño molecular o de cualquier tipo, es también un buen absorbente.

significa más posibilidades de separación molecular. 23. Los iones extraños re-Un buen absorbente parece negro porque la radiación que incide sobre él es ducen el número de moléculas de agua en la interfaz entre el hielo y el agua cuan-absorbida, justo lo opuesto de la reflexión. 73. No. Si los buenos absorben-do ocurre congelación. 25. El bloque no se separa en dos piezas porque el agua tes no fueran también buenos emisores, entonces no sería posible el equilibrio arriba del alambre se rehiela cuando la presión sobre él se reduce. 27. Un líquido térmico. Si un buen absorbente sólo absorbiera, entonces su temperatura subiría libera energía cuando cambia a sólido. 29. Una caloría; 80 calorías; 540 calorías.

por arriba de los absorbentes no tan buenos que hubiera en los

alrededores. Y

Piensa y realiza

si los malos absorbentes fueran buenos emisores, sus temperaturas disminuirían 31. Un géiser y una cafetera percoladora funcionan con el mismo principio. Las por debajo de la de los mejores absorbentes. 75. La energía cedida por la roca burbujas se forman en el fondo, donde el calor se aplica. 33. La "lluvia" que ves en la superficie de la Tierra se transfiere a los alrededores casi tan rápido como se parece a la lluvia natural en que la condensación del vapor conduce a gotas de se genera. Por tanto, no hay acumulación de energía que ocurra en el interior de agua. Difiere en que la lluvia natural es resultado del enfriamiento en las nubes la Tierra. 77. Bajo cielos abiertos, el suelo irradia hacia arriba pero el cielo no de vapor, y no la condensación sobre una superficie fría. 35. Cuando haces esto, irradia casi nada de vuelta hacia abajo. Bajo las bancas, la radiación descendente

¡el hielo termina intacto!

de las bancas reduce la radiación neta proveniente del suelo, lo que resulta en un suelo más caliente, donde es más probable que no se produzca escarcha. 79.

Piensa y resuelve

Para una máxima calidez, usa el abrigo de plástico en el exterior y aprovecha 37. (a) 1 kg de hielo a 08C a agua a 08C requiere 80 kilocalorías. (b) 1 kg de agua el efecto invernadero. 81. Puesto que el aire caliente se eleva, hay una tem-de hielo a 08C a agua en ebullición a 1008C requiere 100 kilocalorías. (c) 1 kg de peratura más alta en el techo que en las paredes. Con una mayor diferencia en agua en ebullición a 1008C a vapor a 1008C requiere 540 kilocalorías. (d) 1 kg las temperaturas interior y exterior, se necesita un aislamiento más grueso para de hielo a 08C a vapor a 1008C requiere (80 100 540) 720 kilocalorías, frenar la transferencia de calor.

o 720,000 calorías. 39. Primero, encuentra el número de calorías que 10 g de vapor a 1008C cederán al cambiar a 10 g de agua a 08C: 10 g de vapor al Piensa y discute

cambiar a 10 g de agua en ebullición a 1008C liberan 5,400 calorías, 10 g de 83. El cobre y el aluminio son mejores conductores que el acero inoxidable y, agua a 1008C que se enfrían a 08C

liberan 1,000 calorías, de modo que están dis -

por tanto, establecen más rápido una temperatura uniforme sobre el fondo del 6,400 cal

sartén y transfieren calor hacia el interior del utensilio. 85. La nieve y el hielo ponibles 6,400 calorías para fundir hielo.

80 gramos de hielo.

del iglú son un mejor aislante que la madera. Estarías más caliente en el iglú que en 80 cal/g

la choza de madera. 87. Deberías estar en desacuerdo porque, aunque la mezcla 41. La cantidad de pérdida de calor por parte del hierro es Q 5 cm D T 5

tenga la misma temperatura (es decir, la misma EC por molécula), las moléculas (0.11 cal/g·8C)(50 g)(808C) 5 440 cal. El hierro perderá una canti-de hidrógeno más ligeras tienen más rapidez que las de nitrógeno más pesadas para dad de calor al hielo, Q = mL. Por tanto, la masa del hielo fundido será la misma EC. 89. Viajan en corrientes ascendentes "térmicas" de aire. 91. Kel-m 5 Q/L 5 (440 cal)/(80 cal/g) 5 5.5 gramos. 43. EP 5 Q; 0.5 mgh 5 cm D T.

vins y grados Celsius tienen el mismo tamaño, y aunque las razones de estas dos es-D T 5 0.5 mgh/cm 5 0.5 gh/ c 5 (0.5) (9.8 m/s2) (100 m)/450 J/kg8C 5 1.18C.

calas producirán resultados muy diferentes, las diferencias en kelvins y las diferencias La masa se cancela.

en grados Celsius serán iguales. Debido a que la ley de enfriamiento de Newton Piensa y clasifica

involucra diferencias de temperatura, puede usarse cualquier escala. 93. Apaga tu 45. A, B, C

calentador y ahorra combustible. Cuando está frío afuera, tu casa pierde calor en Piensa y explica

forma constante. Cuánto pierde depende del aislamiento y la diferencia entre las 47. El agua se evapora rápidamente en el aire seco, y obtiene su energía de tu piel, temperaturas interior y exterior (ley de enfriamiento de Newton). Mantener una que se enfría. 49. Cuando soplas sobre un tazón de sopa caliente, aumentas la T alta

consume más combustible. Para consumir menos combustible, mantén evaporación neta y su efecto de enfriamiento porque retiras el vapor caliente que una T baja y enciente tu calentador por completo. ¿Se necesitará más combusti-tiende a condensarse y reducir la evaporación neta. 51. La energía que mantiene ble para recalentar la casa cuando regreses de lo que se habría necesitado para manen operación al pájaro bebedor proviene del Sol, las lámparas o cualquier cosa tenerla caliente mientras estabas fuera? Absolutamente no. Cuando regresas, estás que caliente la cámara inferior donde tiene lugar la evaporación. Para ver esto, sustituyendo el calor que perdió la casa a una temperatura promedio por debajo simplemente dirige energía térmica a la cámara inferior del pájaro y verás un del promedio normal, pero si hubieras dejado el calentador encendido, habrías aumento en el número de veces por minuto que el pájaro bebe. 53. No. Un suministrado más calor, suficiente para compensar el calor perdido por la casa ventilador no enfría la habitación, sino que facilita la evaporación de la transpi-en su parámetro normal de temperatura más alta. (Tal vez tu instructor demuestre ración, lo cual enfría el cuerpo. 55. El cuerpo mantiene su temperatura a unos esto con la analogía de los baldes de agua con fugas.) 95. Si la temperatura de normales 37C mediante el proceso de evaporación. Cuando el cuerpo tiende a la Tierra aumenta, su tasa de radiación aumenta. Y si mucha de esta radiación sobrecalentarse, suda, lo cual enfría el cuerpo si se deja que el sudor se evapore.

terrestre adicional se bloquea y la temperatura de la Tierra aumenta más, entonces (Es muy interesante que, si estás sumergido en agua caliente, sudes profusamente, su tasa de radiación simplemente aumenta aún más. Se establece una nueva tem-pero no hay evaporación ni enfriamiento, por eso no es recomendable permane-peratura de equilibrio más alta. 97. Si supones 1.0 kW de energía solar sobre cer mucho tiempo en una bañera caliente.) 57. El aire arriba de la temperatura 1 m2 en la superficie de la Tierra, la pregunta es cuántos pies cuadrados hay en un de congelación es frío en la vecindad de un iceberg y la condensación del vapor de metro cuadrado, que es un poco más que 10 pies cuadrados: 1.0 kW = 1,000 W, de agua en el aire resulta en neblina. 59. En un día cuando el exterior de las ven-modo que 1,000 W/10 = 100 W, como con una bombilla de 100 W. 99. En la tanas esté más caliente que el interior, ocurre condensación en el exterior de era industrial, el carbón se quemó para producir la energía que creó la Revolución las ventanas. También puedes ver esto en el parabrisas de tu automóvil cuando Industrial. Los plásticos y muchos materiales modernos están

hechos a partir de combustibles fósiles, los cuales, a largo plazo, deben resultar ser mucho más valio-diriges el acondicionador de aire contra el interior del vidrio. 61. El aire que se sos que convertir carbón y petróleo en calor y humo.

mueve hacia arriba se expande en regiones de menor presión atmosférica. La expansión se acompaña de enfriamiento, lo cual significa que las moléculas se mue-Capítulo 17

ven con rapideces tan bajas que producen coalescencia durante las colisiones, de Preguntas conceptuales

ahí la humedad que conforma la nube. 63. Conforme la energía potencial mo-1. Las cuatro fases comunes de la materia son sólido, líquido, gas y plasma. 3. La lecular se transforma en energía cinética molecular en la condensación, se libera evaporación es el cambio de fase de líquido a gas. 5. La sublimación es el cambio una enorme energía térmica. (La congelación de las gotas para formar hielo agrega de fase de sólido a gas directamente. 7. El vapor contiene más energía que el aún más energía térmica.) 65. Conforme las burbujas se elevan, menos presión

S-18

RESPUESTAS A PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR

se ejerce sobre ellas. 67. Cuando el frasco alcanza la temperatura de ebullición, 7. La principal preocupación son los cambios de energía. 9. Un sistema es un no entra más calor en él porque está en equilibrio térmico con el agua circundante grupo bien definido de átomos, moléculas u objetos. 11. Cuando se realiza traa 100C. Éste es el principio de la "doble ebullición". 69. No. Los alimentos bajo sobre un sistema, aumentan tanto la energía interna como la temperatu-se cuecen por la temperatura alta a la que están sujetos, no por el burbujeo del agua ra. 13. La energía térmica aumenta cuando se realiza trabajo sobre el sistema; circundante. Por ejemplo, pon agua a temperatura ambiente en un vacío y hervirá.

disminuye cuando el sistema realiza trabajo. 15. La temperatura del aire aumen-

¡Pero un huevo en esta agua en ebullición no se cocinará en absoluto! 71. La hu-ta (o desciende) conforme la presión aumenta (o disminuye). 17. Una inversión medad del trapo se convierte en vapor y te quema. 73. El hielo de hecho es frío.

de temperatura es una condición en la cual las regiones superiores de aire son más

¿Por qué frío? Porque la evaporación rápida del agua enfría el agua hasta el punto de calientes que las regiones más bajas. 19. El calor por sí mismo nunca fluye de un congelación. 75. El tiempo de cocción no será diferente para el agua que hierve objeto frío a uno caliente. 21. La contaminación térmica es un calor expulsado vigorosamente que para el agua que hierve moderadamente, porque ambas tienen que es indeseable. 23. La condensación reduce la presión sobre la parte posterior la misma temperatura. La razón por la que el espagueti debe cocerse en agua que de los álabes de una turbina, lo que permite una fuerza neta para girarlas mientras hierve vigorosamente es tan sólo para garantizar que los espaguetis no se peguen el agua se recicla. 25. La energía de alta calidad tiende a transformarse en energía entre sí ni en el sartén. Para ahorrar combustible, sólo revuelve el espagueti en agua de menor calidad. 27. Una medida del desorden se llama entropía. 29. Nin-que hierve moderadamente. 77. El punto de ebullición del agua es más alto en gún sistema puede tener su temperatura absoluta reducida a cero.

un reactor nuclear debido al aumento de presión. El reactor se comporta como una Piensa y realiza

olla de presión. 79. El agua en el radiador presurizado no hierve, aun cuando su 31. Sí, ocurre un colapso, pero no es tan violento como cuando en el plato usas temperatura exceda 100C (como el agua en una olla de presión). Pero cuando se agua caliente.

retira en forma súbita la tapa del radiador, la presión disminuye y el agua a temperatura alta hierve de inmediato. ¡No acerques la cabeza a un radiador caliente cuando Sustituye y listo

T

—

caliente

T fría

le quites la tapa! 81. La humedad de tu piel se congela a una temperatura por 33. Eficiencia ideal

5 (3,000 K 2 300 K)/3,000 K 5 90%.

T

debajo de 0

caliente

C sólo porque contiene sal. El hielo muy frío en contacto con tu mano Piensa y resuelve

congela la humedad de la piel de tu mano y tienen lugar enlaces entre tu piel y el 35. Al convertir a temperaturas absolutas, se tiene 600C 273 600 873 K; hielo. Es por esto que está "pegajoso". 83. Sin duda las nevadas son posibles en 320C 273 320 593 K. Entonces la eficiencia ideal es (873 593)/873

días muy fríos. Pero cuando se forma nieve, la temperatura del aire aumenta por 0.32, o 32%. Si en la ecuación se usan valores Celsius, resultaría en un 47%

el cambio de estado del H O de gas a sólido o de líquido a sólido. Por eso uno ob-incorrecto. ¡No es así! 37. Si por "el doble de frío" ella entiende la mitad de la 2

serva calidez cuando está nevando, y por tanto, uno malinterpreta que no puede ha-temperatura absoluta, entonces la temperatura sería (1/2)(273 10) 141.5 K.

ber nevada si está frío. (De igual modo, es un hecho que las orejas siguen creciendo Para encontrar cuántos grados Celsius bajo 0C es esto, primero resta 141.5 K de toda la vida. De modo que los ancianos suelen tener orejas grandes. Algunas perso-273 K; esto es 273 K 141.5 K 131.5 K abajo del punto de congelación nas que ven a niños con orejas gran des equivocadamente dicen que están destinados del hielo, o 131.5C (o, simplemente, 141.5 K 273 K 131.5C). ¡ Muy a tener una vida larga.) 85. El peso del hielo arriba tritura los cristales de hielo frío! 39. (a) El error de Wally fue no convertir a kelvins: 300C 273 300

en el fondo, lo que forma una capa líquida sobre la cual se desliza el glaciar. 87.

573 K, y 25C 273 25 298 K. (b) Entonces la eficiencia máxima es (573 K

La madera fundirá más hielo porque, debido a su gran capacidad calorífica especí-298 K)/573 K 0.48, o 48%. 41. El trabajo que

realiza el martillo sobre el fica, contiene más energía interna. Debido a la menor cantidad de energía interna clavo es F d, y el cambio de temperatura del clavo puede encontrarse a partir del metal y a su mayor conductividad, fundirá menos hielo más rápido. 89. Tus de Q cm T. Primero, pon todo en las unidades convenientes para calcular: gafas están más frías que el aire adentro, y la condensación del aire en la habita-6.0 g 0.006 kg; 8.0 cm 0.08 m. Entonces F d = 600 N 0.08 m 48 J, ción ocurre sobre tus gafas, otro ejemplo de la Figura 17.8. 91. El azúcar no se y 48 J (0.006 kg)(450 J/kgC)(T), que puede resolverse para obtener congela con el agua del ponche, de modo que el ponche medio congelado tiene el T 48 J/(0.006 kg 450 J/kgC) 17.8C. (Observarás un efecto simi-azúcar de la mezcla original, el doble de la concentración original. 93. La práctica lar cuando retires un clavo de un trozo de madera. El clavo que saques estará de enrollar papel alrededor del hielo en una nevera no es aconsejable, a menos muy caliente.)

que sólo quieras hacer que el hielo dure más tiempo a costa de reducir el efecto de Piensa y explica

enfriamiento. El periódico aislante retarda el proceso de fundido, lo cual disminuye 43. En el caso del horno a 500 grados, hace mucha diferencia: 500 kelvins es la extracción de calor de los alrededores. Los alrededores se enfrían principalmente 227C, muy diferente que 500C. Pero en el caso de la estrella de 50,000 gra-porque el hielo se funde. Inhibir esta fusión es reducir el proceso de enfriamiento dos, el incremento de 273 de cualquier forma casi no hace diferencia. Sea que deseado. 95. Cada gramo de agua que experimenta congelación libera 80 calo -

le des o le quites 273, la estrella todavía es de 50,000 K, o 50,000C cuando rías de energía térmica al sótano de enlatados. Esta liberación continua de energía redondeas. 45. Usualmente no. Experimentan el mismo cambio en energía por el agua en congelación impide que la temperatura del sótano descienda por térmica, que se traduce al mismo cambio de temperatura cuando ambos obje-debajo de 08C. El azúcar y las sales de los alimentos enlatados impiden que se tos tienen la misma masa y están compuestos del mismo material. 47. Sí. Tú congelen a 0C. Sólo cuando toda el agua en la tina se congele, la temperatura del realizas trabajo sobre el líquido cuando lo agitas vigorosamente, lo cual aumenta sótano descenderá por debajo de 08C y entonces congelará los alimentos enlatados.

su energía interna. Esto se observa por un aumento de la

temperatura. (A me-Por tanto, el granjero debe sustituir la tina en cuanto toda el agua se haya congela-diados del siglo XIX, James Joule, al medir la temperatura de un líquido antes do. 97. En ambos modos de operación, una bomba térmica mueve calor de un y después de realizar un trabajo conocido con un agitador, reveló lo que él lla-lugar frío a uno caliente. 99. Respuesta abierta.

mó "el equivalente mecánico del calor", un descubrimiento que condujo a la Piensa y discute

ley general de conservación de la energía.) 49. El cambio de energía interna es 101. Cuando un dedo húmedo se sostiene al viento, la evaporación es mayor 100 J – 80 J 20 J. 51. Tú comprimes aire cuando inflas un globo, lo que en sobre el lado ventoso, por lo cual se siente frío. El lado frío de tu dedo está a favor consecuencia calienta el globo. 53. El aire se calienta porque se comprime de del viento. 103. En este caso hipotético, la evaporación no enfriaría el líquido manera adiabática. 55. La energía solar es la fuente final de energía. 57. En restante porque la energía de las moléculas salientes no sería diferente de la energía concordancia con la ecuación de Carnot, la eficiencia es mayor con una mayor de las moléculas que quedaran. Aunque la energía interna del líquido disminuiría diferencia de temperaturas entre la fuente de calor (cámara de combustión en con la evaporación, la energía por molécula no cambiaría. No ocurriría un cambio el motor) y el sumidero (aire que rodea el escape). Además, bajar la tempera-de temperatura en el líquido. (Por otra parte, en este caso hipotético, el aire cir-tura del ambiente aumenta la eficiencia ideal. 59. Sólo si el sumidero estuviecundante se enfriaría. Las moléculas que se alejan de la superficie del líquido serían ra a cero absoluto (0 K) una máquina térmica tendría una eficiencia ideal de frenadas por la fuerza de atracción del líquido que actúa sobre ellas.) 105. Pue-100%. 61. No. En este caso el sumidero de calor también está en la habitación.

des agregar calor sin cambiar la temperatura cuando la sustancia experimenta un Es por esto por lo que las bobinas de condensación están en una región afuera cambio de fase. 107. Puedes extraer calor sin cambiar la temperatura cuando de la región que se va a enfriar. La temperatura de la habitación en realidad au-la sustancia experimenta un cambio de fase. 109. El gas predominante en una menta porque el motor del refrigerador calienta el aire circundante. 63. Tú te burbuja de agua hirviendo es H O. ¿Creíste que ésta era una pregunta capciosa?

enfrías por el ventilador, que sopla aire sobre ti para aumentar la

tasa de evapo-2

ración de tu piel, pero eres una parte pequeña del sistema global, que se calien-Capítulo 18

ta. 65. No viola la segunda ley de la termodinámica porque un agente externo Preguntas conceptuales

realiza trabajo sobre el sistema. 67. Tú sí realizas trabajo al comprimir el gas, lo 1. El significado es "movimiento de calor". 3. El volumen disminuye en 1/273

que aumenta la energía interna. 69. El pájaro hace lo que las máquinas térmicas: por cada 1C de cambio de temperatura. 5. El volumen se aproxima a 0.

convierte energía de un tipo (solar) en energía mecánica (el balanceo del pájaro).

RESPUESTAS A PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR

S-19

71. La energía total del Universo tiende hacia la indisponibilidad con el tiempo.

Piensa y realiza

Las cosas más calientes se enfrían mientras las cosas frías se calientan. Si esto es 29. ¡Una actividad que hay que realizar! 31. Respuesta abierta.

cierto, el Universo tiende hacia una temperatura común, la llamada "muerte tér-Sustituye y listo

mica", cuando la energía ya no puede realizar trabajo. (Pero no se sabe con seguri-33. Al usar T 5 1/ f, se tiene (a) 0.10 s, (b) 5 s, (c) 1/60 s. 35. v 5 f l 5

dad si las leyes de la termodinámica se aplican al Universo en su totalidad, pues no (200 Hz)(1.7 m) 5 340 m/s.

se entiende la fuente última del vasto remolino energético que ahora es aparente en todo el Universo. ¡La naturaleza puede tener algunas sorpresas!) 73. Las par-Piensa y resuelve

celas adiabáticas ocurren tanto en la atmósfera como en el océano.

75. Hay 37. (a) Frecuencia 2 subidas y bajadas/segundo 2 hertz. (b) Periodo 1/ f más formas en que las moléculas en la fase líquida pueden moverse, lo que resulta ½ segundo. (c) Amplitud es la distancia desde la posición de equilibrio hasta el en un movimiento más aleatorio y caótico. 77. No. La congelación del agua desplazamiento máximo: la mitad de la distancia pico a pico de 20 cm, o 10 cm.

no es una excepción al principio de entropía porque se ha puesto trabajo en el 39. (a) Periodo 5 1/frecuencia 5 1/(256 Hz) 5 0.00391 s, o 3.91 ms. (b) Rapi-sistema de refrigeración para provocar este cambio de estado. En realidad hay dez 5 longitud de onda 3 frecuencia, de modo que longitud de onda 5 rapidez/

un mayor desorden neto cuando se considera el ambiente que rodea al refrigera-frecuencia 5 (340 m/s)/(256 Hz) 5 1.33 m. 41. T 5 (75 s)/(15 balanceos) 5

dor. 79. Dichas máquinas violan al menos la segunda ley de la termodinámica, 5.0 s. A partir de T 5 2 L g

/ , g 5 42 L / T 2 5 42(1.00 m)/(5 s)2 5 1.6 m/s2.

y la primera ley también. Estas leyes están tan bien sustentadas por tantos experi-Piensa y clasifica

mentos durante tanto tiempo que la Oficina de Patentes prudentemente supone 43. A, B, D, C 45. A, C, B

que hay un error en el aclamado invento y no en las leyes de la termodinámica.

Piensa y explica

Piensa y discute

47. Un péndulo más corto se balancea de ida y vuelta con una frecuencia mayor 81. No. La energía interna, a diferencia de la temperatura, no es una cantidad proy un periodo más corto. 49. Si supones que el centro de gravedad del maletín medio. 83. Una brisa en un día caluroso reduce el grosor de esta cobija térmica, no cambia cuando se carga con libros, la tasa de péndulo del maletín vacío y del e incluso la elimina, lo que es seguido por sobrecalentamiento del cuerpo. El resul-maletín cargado sería la misma. Esto es así porque el periodo de un péndulo es tado inverso ocurre en un día frío, cuando tu piel se siente más fría como resultado independiente de la masa.

Debido a que la longitud del péndulo no cambia, de la brisa. 85. Decir que un lugar es el doble de cálido que otro es decir que las la frecuencia, y por tanto el periodo, no cambiarían. 51. El periodo aumenta temperaturas dadas son temperaturas absolutas. Una temperatura en Boston de porque periodo y frecuencia son recíprocos entre sí. 53. La longitud de onda se 408F es aproximadamente 48C, que es 277 K. El doble de 277 K es 554 K, que es alarga al doble. La rapidez y la frecuencia son directamente proporcionales. 55.

2818C, que es más alto que 5008F. ¡De modo que un día de 808F en Florida no Los periodos son iguales. Es interesante que una visión lateral de un cuerpo que se es el doble de cálido que un día de 408C en Boston! 87. El término contamina-mueve en movimiento circular uniforme se vea que vibra en línea recta. ¿Cómo?

ción se refiere a un subproducto indeseable de algún proceso. Lo deseable o inde-Exactamente con movimiento armónico simple. De modo que el movimiento seable de un subproducto particular es relativo y depende de las circunstancias. Por hacia arriba y hacia abajo de los pistones en el motor de un automóvil es ar-ejemplo, usar calor de desecho de una planta eléctrica para calentar una alberca mónico simple y tienen el mismo periodo que el cigüeñal que impulsan y gira podría ser deseable, mientras que usar el mismo calor para calentar un arroyo de de manera circular. 57. La frecuencia de onda y la frecuencia de sacudida son truchas podría ser indeseable. 89. No. Parte de la energía eléctrica que se usa iguales. Esta igualdad no depende del tipo de onda, porque la frecuencia de todas en encender una lámpara se transfiere por conducción y convección al aire, parte las ondas es la misma que la frecuencia de la fuente vibratoria. 59. Para pro -

se radia con longitudes de onda invisibles ("radiación térmica") y se convierte en ducir una onda transversal con un Slinky, sacúdelo de ida y vuelta en una di-energía interna cuando se absorbe, y parte aparece como luz. Muy poca energía rección que sea perpendicular a la longitud del Slinky. Para producir una onda se convierte en luz en una lámpara incandescente, y un poco más se convierte en longitudinal, sacúdelo de ida y vuelta a lo largo de la dirección de su longitud, una lámpara fluorescente. Incluso entonces, toda la energía que toma forma de luz de modo que se produzca una serie de compresiones y rarefacciones. 61. La luz se convierte en energía interna cuando la luz es absorbida por los materiales sobre violeta tiene la frecuencia más alta. 63. La frecuencia del segundero de un reloj los cuales incide. De este modo, por la primera ley, toda la energía eléctrica a final es de un ciclo por minuto; la frecuencia del

minutero es de un ciclo por hora; de cuentas se convierte en energía interna. Por la segunda ley, la energía eléctrica para la manecilla horaria la frecuencia es de un ciclo por 12 horas. Para expresar organizada degenera a la forma más desorganizada, energía interna. Las leyes de la estos valores en hertz, es necesario convertir los tiempos a segundos. Entonces termodinámica no se violan. 91. Una máquina de movimiento perpetuo sólo se encuentra para el segundero la frecuencia = 1/60 hertz, para el minutero la funcionaría si no hubiera fricción, fricción cero. En la práctica, en el mundo a frecuencia 1/3,600 hertz, y para la horaria la frecuencia 1/(12 3,600) gran escala, siempre hay fricción, de modo que el movimiento perpetuo necesitaría 1/(43,200) hertz. 65. La frecuencia de vibración y el número de ondas que que la energía aumentara, lo que viola el principio de conservación de la energía.

pasan por cada segundo son iguales. 67. Para ondas mecánicas, la fuente es Por otra parte, los átomos y las moléculas están en continuo movimiento perpe-algo que vibra. Para ondas electromagnéticas, la fuente son cargas eléctricas que tuo, y rebotan elásticamente unos contra otros, de modo que no disipan energía vibran. 69. La energía de una ola se dispersa a lo largo de la circunferencia cre-ni "se agotan". 93. (a) Sí, muy probablemente. Dos caras saldrían en promedio ciente de la onda hasta que su magnitud disminuye hasta un valor que no puede 1 lanzamiento de cada 4. (b) No es probable. La posibilidad de que las diez mone-distinguirse de los movimientos térmicos en el agua. La energía de las ondas das salgan todas cara es sólo de 1 en 1,000. (c) Extremadamente improbable, inclu-se suma a la energía interna del agua. 71. La rapidez de la luz es 300,000 km/s, so con una vida de intentos. Las leyes de la termodinámica se basan en estadísticas aproximadamente un millón de veces más rápido que el sonido. Debido a esta de grandes números.

diferencia en rapideces, el relámpago se ve un millón de veces más pronto de lo Capítulo 19

que se escucha. 73. La frecuencia se duplica. 75. (a) La frecuencia aumenta.

Preguntas conceptuales

(b) La longitud de onda disminuye. (c) La rapidez no cambia (porque el aire 1. Un meneo en el tiempo es una vibración; un meneo en el espacio y en el tiempo permanece sin movimiento con relación a ti). 77. No. Los efectos de ondas más es una onda. 3. El periodo es

el tiempo para un balanceo completo de ida y cortas y más estiradas se cancelarán entre sí. 79. La policía usa ondas de radar vuelta. 5. Una curva sinusoidal es una representación pictórica de una onda. 7.

que se reflejan de los automóviles en movimiento. A partir del corrimiento en Hay 101.7 millones de vibraciones por segundo. 9. La energía se mueve desde la las frecuencias regresadas, se determina la rapidez de los reflectores (cuerpos de los fuente al receptor. 11. En una onda transversal, las vibraciones son perpendicula-automóviles). 81. La onda de proa o de choque en realidad es la superposición res a la dirección de viaje de la onda. 13. La longitud de onda de una onda longi-de muchas ondas de menor amplitud que interfieren constructivamente. Cuando tudinal es la distancia entre compresiones o rarefacciones sucesivas. 15. Cuando la cresta de una onda se traslapa con la cresta de otra, y luego otra, se produce una más de una onda ocupa el mismo espacio al mismo tiempo, los desplazamientos se onda de mayor amplitud. 83. Una onda de choque, y el resultante estampido suman en cada punto. 17. Todas las ondas pueden mostrar interferencia. 19.

sónico, se producen siempre que un avión es supersónico, ya sea que el avión Las ondas estacionarias pueden formarse tanto de ondas transversales como de acabe de convertirse en supersónico o que lo haya sido durante horas. 85. Sí.

longitudinales. 21. El efecto Doppler puede observarse tanto con ondas trans-Un pez supersónico en agua produciría una onda de choque y, por tanto, un versales como con longitudinales. 23. Para continuar con las ondas producidas, estampido sónico por la misma razón que lo haría si viajara más rápido que el el bicho debe nadar a la rapidez de la onda; para producir una onda de proa el sonido en el aire. 87. Respuesta abierta.

bicho debe nadar más rápido que la rapidez de la onda. 25. Mientras más rápida Piensa y discute

sea la fuente, más estrecha será la forma en V. 27. Falso. El avión pudo haber 89. La frecuencia de un péndulo depende de la fuerza restauradora, que es la superado la rapidez del sonido antes.

gravedad. De igual modo, la masa no afecta la aceleración de la caída libre, como

se demuestra en la Figura 19.1. 91. Es importante observar que la rapidez de diferente que otras partes. Esto ocurre en vientos no uniformes y temperaturas la onda involucra la tasa de viaje mientras que la frecuencia de la onda tiene que no uniformes. Es interesante que si los vientos, las temperaturas u otros facto -

ver con la frecuencia de la vibración. ¡Dos conceptos diferentes! 93. El hecho de res no pudieran cambiar la rapidez del sonido, entonces no habría refracción. (El que escuches un avión en una dirección que difiere de dónde lo ves tan sólo sig-hecho de que la refracción en verdad ocurra es evidencia de que la rapidez del nifica que el avión está en movimiento, y no necesariamente que sea más rápido sonido cambia.) 65. El sonido se escucha con más facilidad cuando el viento que que el sonido (un estampido sónico sería evidencia de un vuelo supersónico). Si viaja hacia el escucha a elevaciones por arriba del nivel del suelo viaja más rápido la rapidez del sonido y la rapidez de la luz fuesen iguales, entonces escucharías un que el viento cerca del suelo. Entonces las ondas se doblan hacia abajo como es avión donde aparece en el cielo. Pero, dado que las dos rapideces son tan diferen-el caso de la refracción del sonido que se muestra en la Figura 20.9. 67. Un eco tes, el avión que ves aparece adelante del avión que escuchas.

es más débil que el sonido original porque el sonido se dispersa y, por tanto, es Capítulo 20

menos intenso con la distancia. Si estás en la fuente, el eco sonará como si se ori-Preguntas conceptuales

ginara en el otro lado de la pared desde la cual se refleja (tal como tu imagen en un 1. El sonido es una forma de energía. 3. Un joven generalmente puede escu-espejo parece provenir desde atrás del vidrio). Además, es probable que la pared char de 20 a 20,000 hertz. 5. El aire es un peor conductor que los sólidos y no sea un reflector perfecto. 69. Primero, en el espacio exterior no hay aire u líquidos. 7. Una compresión es una región de aire comprimido; una rarefacción otro material para transportar sonido. Segundo, si existiera, la luz que se mueve es una región de aire a presión baja. 9. La rapidez del sonido depende de las más rápido llegaría a ti antes que el sonido. 71. Los soldados rompen el paso condiciones del viento, la temperatura y la humedad del aire. No depende de la so-cuando cruzan un puente para no ponerlo en vibración o en resonancia forzada, noridad o la frecuencia del sonido. 11. El

sonido viaja más rápido en aire calien-lo cual podría derrumbar el puente. 73. De acuerdo con la rapidez del sonido, te. 13. La energía sonora se disipa en energía térmica. 15. Una reverberación mas no con la frecuencia. La frecuencia del sonido sólo depende de la vibración de es sonido reflejado múltiples veces. 17. El sonido se dobla hacia abajo cuando la fuente en sí, no del medio. 75. Las cuerdas inferiores resuenan con las cuerdas su rapidez es menor cerca del suelo. 19. El ultrasonido es un sonido compues-superiores. 77. Estos dispositivos que cancelan el ruido usan interferencia para to de frecuencias más altas que el campo auditivo humano. 21. La elasticidad, cancelar el sonido del martillo neumático en los oídos de su operador. Debido al tamaño y forma de un objeto determinan su frecuencia natural. 23. Al sinto-bajo ruido del martillo neumático resultante en los oídos del operador, él puede nizar el radio a cierta frecuencia, ajustas el circuito receptor para que vibre sólo a escuchar tu voz claramente. Sin embargo, tú, sin los audífonos, no experimen-la frecuencia de la estación. 25. Las ondas se cancelan cuando son idénticas y tas tal cancelación de sonido, de modo que la voz del operador es ahogada por están fuera de fase. 27. El resultado es la cancelación del sonido. 29. Ocurrirá el intenso ruido del martillo neumático. 79. El vidrio se quiebra debido a la una frecuencia de batimiento de 4 Hz.

resonancia, cuando la acumulación de vibraciones en el vidrio supera el punto de rompimiento del mismo. 81. No. La misma palabra en inglés se refiere a Piensa y realiza

diferentes aspectos de la música. El beat (compás) de la música involucra el ritmo, 31. El sonido debe ser más fuerte bajo el agua. La resonancia en la tina puede y los batimientos (beats) involucran pulsaciones debidas a interferencia. 83. El ser divertida.

afinador de piano debe aflojar la cuerda del piano. Cuando escucha primero Piensa y resuelve

3 batimientos por segundo, el afinador sabe que está 3 hertz fuera de la frecuencia 33. longitud de onda rapidez/frecuencia

correcta. Pero esto podría estar 3 hertz arriba o 3 hertz abajo. Cuando aprieta la cuerda y aumenta su frecuencia, una menor frecuencia de batimiento le habría 340 m/s

=

= 1 m.

indicado que estaba en la vía correcta. Cuando no hay frecuencia de batimiento, 340 Hz

las frecuencias coinciden. 85. Escucharás sonido a una frecuencia de 2 kHz, la De igual modo para una onda de 34,000 hertz,

frecuencia de batimiento de las dos frecuencias superiores.

340 m/s

longitud de onda =

= 0.01 m = 1 cm.

Piensa y discute

34,000 Hz

87. El sonido viaja más rápido en aire húmedo porque las moléculas de vapor de 35. El fondo marino está 4,590 metros abajo. La demora temporal de 6.0 segun-agua menos masivas, H O, viajan más rápido que las moléculas más masivas 2

dos significa que el sonido llega al fondo en 3.0 segundos. Distancia 5 rapidez de N y O a la misma temperatura. Este movimiento más rápido resulta en que el 2

2

3 tiempo 5 1,530 m/s 3 3.0 s 5 4,590 m. 37. El sonido final que escuchas sonido viaja más rápido. 89. La regla es correcta. La rapidez del sonido en el aire después de ver que Sally deja de martillar se originó con el último golpe que viste.

(340 m/s) puede redondearse a ⅓ km/s. Entonces, a partir de distancia rapidez El primer sonido habría aparecido como un silencio, y los sonidos sucesivos esta-tiempo, se tiene distancia = ⅓ km/s (número de segundos). Observa que ban sincronizados con golpes sucesivos. En 1 segundo el sonido viaja 340 metros el tiempo en segundos dividido entre 3 produce el mismo valor. 91. Las ondas en aire, la distancia entre tú y Sally. 39. Existen tres posibilidades de frecuencias largas se cancelan más, lo cual hace al sonido resultante tan metálico. Por ejemplo, de batimiento: 2 Hz, 3 Hz y 5 Hz. Éstas son las diferencias en las frecuencias de cuando los conos de las bocinas están, por decir, separados 4 centímetros, las diapasón: 261 2 259 5 2 Hz, 261 2 256 5 5 Hz y 259 2 256 5 3 Hz.

ondas con más de 1 metro de largo están casi 180 fuera de fase, mientras que las ondas de 2 centímetros están en fase. Las frecuencias más altas se cancelan Piensa y clasifica

menos con este procedimiento. Debes intentar esto para apreciarlo.

41. B, C, A

Capítulo 21

Piensa y explica

Preguntas conceptuales

43. La luz viaja aproximadamente un millón de veces más rápido que el sonido, 1. La música está compuesta de notas periódicas; el ruido es irregular. 3. Las es por ello la demora entre lo que ves y lo que escuchas. 45. Entre la Tierra y notas con altura alta tienen frecuencias altas. 5. Un decibel es una medida de otros planetas hay vacío, y el sonido no viaja en el vacío. 47. Las abejas zumban intensidad sonora. 7. Un sonido de 30 dB es 1,000 veces más intenso que el cuando vuelan porque baten sus alas a frecuencias audibles. 49. La frecuencia umbral de audición. 9. Los sonidos más sonoros que uno puede tolerar tienen portadora de las ondas electromagnéticas emitidas por la estación de radio es intensidades un billón de veces mayores que los sonidos más débiles. 11. La 101.1 MHz. 51. La longitud de onda del sonido proveniente de la fuente A frecuencia del segundo armónico es el doble, o 400 Hz. 13. La calidad mu-es la mitad de la longitud de onda del sonido proveniente de la fuente B. 53. La sical está determinada por la variedad de tonos parciales. 15. Las tres clases luz viaja aproximadamente un millón de veces más rápido que el sonido en el son cuerdas vibratorias, columnas de aire vibratorias y percusiones. 17. Fourier aire, de modo que tú ves un evento distante un millón de veces más pronto de lo descubrió que las ondas complejas pueden descomponerse en ondas sinusoidales que lo escuchas. 55. Cuando el sonido pasa por un punto particular en el aire, simples que se suman. 19. Los fonógrafos capturan el sonido de forma analógi-el aire primero se comprime y después se rarifica conforme pasa el sonica, los CD de forma digital.

do. De modo que su densidad aumenta y luego disminuye conforme la onda pasa. 57. Puesto que la nieve es un buen absorbente del sonido, refleja poco Piensa y realiza

sonido, de ahí el silencio. 59. La Luna es silenciosa porque no tiene

atmósfera 21. ¡Primero consigue un reloj que haga tictac! 23. ¡Esta actividad puede ser que transmita sonidos. 61. Si la frecuencia del sonido se duplica, su rapidez no interesante!

cambiará en absoluto, pero su longitud de onda se "comprimirá" a la mitad. La Piensa y resuelve

rapidez del sonido sólo depende del medio por el cual viaja, no de su frecuen-25. Periodo 1/ f 1/440 segundos (0.0023 s, o 2.3 ms). 27. La escala decibel cia, su longitud de onda o de su intensidad (hasta que la intensidad se hace tan se basa en potencias de 10. El oído responde a la intensidad sonora en forma grande que resulta una onda de choque). 63. No. La refracción es resultado del logarítmica. Cada vez que la intensidad del sonido se hace 10 veces mayor, el nivel cambio en las rapideces de onda, donde parte de la onda viaja con una rapidez de intensidad en decibeles aumenta por 10 unidades. De modo que un sonido de

RESPUESTAS A PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR

S-21

(a) 10 dB es diez veces más intenso que el umbral de audición, (b) 30 dB es mil o ha aprendido a percibir. Esto se aplica a la apreciación del arte, al gusto por la veces más intenso que el umbral de audición y (c) 60 dB es un millón de veces más comida y la bebida, y al valor que se le da a lo que huele y a las texturas que toca.

intenso que el umbral de audición. 29. Un sonido de 40 dB es diez veces La percepción de lo que es real en términos de creencias religiosas y políticas y más intenso que un sonido de 30 dB. 31. El segundo armónico es la primera oclas nociones acerca del lugar que cada uno ocupa en el esquema de las cosas son tava (doble de la frecuencia fundamental) y el cuarto armónico es la segunda octa- producto de lo que cada quien aprendió (o no aprendió).

va (cuatro veces la frecuencia fundamental), de modo que hay un armónico, el Capítulo 22

tercero, entre la primera y segunda octavas. La tercera octava, con una frecuencia Preguntas conceptuales

ocho veces la frecuencia de la fundamental, es la misma que el octavo armónico, 1. Electrostática es el término para la electricidad en reposo. 3. El núcleo y sus de modo que hay tres armónicos

(quinto, sexto y séptimo) entre la segunda y protones tienen carga positiva; los electrones tienen carga negativa. 5. La carga tercera octavas. (También puedes obtener las respuestas si piensas en longitudes neta normal es cero. 7. La conservación de la carga significa que la carga no de onda. El segundo armónico tiene la mitad de la longitud de onda de la funda-puede crearse o destruirse, sino sólo transferirse. 9. Un electrón (o protón) tiene mental, el tercer armónico tiene un tercio la longitud de onda, el quinto armónico exactamente un cuanto de unidad de carga. 11. Ambas son leyes del inverso al tiene un quinto la longitud de onda, y así sucesivamente. Las longitudes de onda cuadrado. La principal diferencia es que la gravitación sólo es de atracción, mien-de las octavas son un medio, un cuarto, un octavo, y así sucesivamente, de modo tras que las fuerzas eléctricas pueden repeler. 13. Los átomos de los aislantes que corresponden a los armónicos segundo, cuarto, octavo, etcétera.)

son malos conductores debido a la fuerte retención de sus electrones. 15. Un Piensa y clasifica

transistor está compuesto de delgadas capas de materiales semiconductores. Sus 33. A, C, B

funciones consisten en controlar el flujo de electrones, amplificar señales y actuar Piensa y explica

como interruptores. 17. Los electrones se transfieren de un lugar a otro. 19.

35. Una altura mayor significa una frecuencia más alta. 37. Las cuerdas se ca-Durante las tormentas eléctricas ocurre carga por inducción. 21. A diferencia lientan y se expanden mientras se pulsan. Por tanto, deben afinarse mientras están de un objeto cargado, un objeto polarizado puede no tener carga neta. 23. H O

2

calientes para reducir al mínimo una nueva afinación cuando se está en el escena-es un dipolo eléctrico. 25. La dirección de un campo eléctrico es la dirección de rio. 39. Una altura más baja se produce cuando la cuerda de una guitarra (a) se la fuerza sobre una carga positiva. 27. El campo eléctrico en el interior del con-alarga, (b) se afloja de modo que la tensión se reduzca y (c) se hace más masiva, ductor se cancela a cero. 29. No. Varios miles de volts es diferente de la razón por lo general mediante devanados de alambre alrededor

de la cuerda. Es por de varios miles de volts por coulomb. El voltaje se mide en volts; voltaje/coulomb ello que las cuerdas de los bajos son gruesas: mayor inercia. 41. Las frecuencias es energía y se mide en joules. Varios miles de joules por coulomb no es mucha del sonido y de la cuerda oscilatoria son iguales. 43. Si la longitud de onda de energía si tienes una pequeña fracción de coulomb.

una cuerda vibratoria se reduce, como cuando la presionas con el dedo contra un Piensa y realiza

traste, la frecuencia de la vibración aumenta. Esto se escucha como un aumento 31. ¡En climas secos ésta es una molestia común! 33. De hecho, el chorro se de altura. 45. Los brazos más largos tienen una mayor inercia rotacional, lo cual desvía, debido a la polaridad de las moléculas de agua.

significa que serán más resistentes a la vibración y lo harán a una frecuencia más baja. 47. La cuerda más delgada tiene menos masa y menos inercia y, por tanto, Sustituye y listo

una frecuencia más alta. 49. Una cuerda de guitarra pulsada vibraría durante un q q

1 2

9

2

2 (0.1 C)(0.1 C)

35. F = K

= 9 ×10 N

9

• m /C

= 2.25 ×10 N.

tiempo más largo sin una caja acústica, porque menos aire se pone en movimiento d 2

(0.2 m)2

por unidad de tiempo, lo cual significa que la energía de la cuerda

vibratoria dis-Piensa y resuelve

2

minuye con más lentitud. 51. Además de hojas de papel en los extremos de so-kq

37. A partir de la ley de Coulomb, la fuerza está dada por F =

, de modo que

porte de la cuerda, cuando una cuerda vibra en dos segmentos puede colocarse un d 2

el cuadrado de la carga es

trozo en el nodo de su centro. Para tres segmentos, pueden sostenerse dos trozos, 2

2

2

Fd

(20 N)(0.06 m)

cada uno a un tercio de la distancia total desde cada extremo. 53. La amplitud

=

=

= 8.0 × −

q

10 12 C2. Al sacar la raíz cuadrada de esto

9

2

2

en una onda sonora corresponde a la alta presión de la compresión o, de manera k

9 ×10 N • m /C

equivalente, a la baja presión de la rarefacción. 55. El patrón a la derecha tiene se obtiene q 5 2.8 3 10–6 C, o 2.8 microcoulombs. 39. F grav 5 mg 5 (9.1 3

mayor amplitud y por tanto es más sonoro. 57. La intensidad sonora es un 10–31 kg)(9.8 m/s2) 5 8.9 3 10–30 N. F elec 5 qE 5 (1.6 3 10–19 C)(10,000 V/m) atributo meramente objetivo y físico de una onda sonora y puede medirse con di-5 1.6 3 10–15 N, ¡más de 1014 veces mayor que la fuerza gravitacional!

versos instrumentos acústicos. La sonoridad, aunque muy relacionada, es una sen-41. El campo eléctrico es fuerza dividida entre carga:

sación fisiológica y puede variar de una persona a otra o en una mism persona en F

3.2 × −

10 4 N

6

diferentes momentos. 59. Un órgano electrónico produce los sonidos de varios E =

=

= 2 ×10 N/C.

q 1.6 × −

10 10 C

.

instrumentos musicales al duplicar y superponer las ondas sinusoidales que constituyen las ondas globales producidas por estos instrumentos. 61. Tu voz suena (La unidad N/C es la misma que la unidad V/m, de modo que el cam-más plena en una ducha principalmente por el pequeño recinto que hace que tu po puede expresarse como 2 millones de volts por metro.) 43. El poten-voz reverbere mientras se refleja de pared a pared. 63. El campo de audición cial se define como la energía por unidad de carga, de modo que V 5 PE/ q humana, desde más o menos 20 Hz hasta

20,000 Hz, es un factor de alrededor 5 (0.1 J)/(1.0 3 1026 C) 5 1 3 105 V, o 100,000 V. 45. (a) A par-

−

de 1,000. Esto es diez octavas porque diez duplicaciones de frecuencia producen F

F

mg (1.1×10 14)(9.8)

tir de E = , se ve que

=

=

=

= 6.4 = −

q

10 19 C.

un factor de alrededor de 1,000 (1,024 para ser exactos). El rango de un piano q

E

E

1.68 ×105

es un poco más que siete octavas. 65. La frecuencia del segundo armónico es el 6.4 × −

10 19 C

doble de la fundamental, o 440 Hz. El tercero es tres veces el armónico, o 660 Hz.

(b) Número de electrones 5

=

=

1.6 × −

10 19

5 4 electrones.

C/electrón

67. Sin incluir los puntos extremos, hay cinco nodos en una onda estacionaria que tiene tres longitudes de onda de largo, y siete nodos en una onda esta -

Piensa y clasifica

cionaria que tiene cuatro longitudes de onda de largo. (¡Realiza un dibujo y cuén-47. C, B, A

talas!) 69. Un analizador Fourier es un dispositivo que ordena cada una de las Piensa y explica

ondas sinusoidales de una mezcla de dos o más ondas sinusoidales, que es justo lo 49. Los electrones están holgadamente enlazados en el exterior de los átomos, que hace el oído humano. Tú escuchas los tonos puros que constituyen un tono mientras que los protones están enlazados con firmeza en el interior de los núcleos complejo. 71. Respuesta abierta.

atómicos. 51. La ropa se carga cuando los electrones provenientes de una pren-Piensa y discute

da de un material se frotan sobre otro material. Si los materiales fueran buenos 73. La longitud de una flauta es crucial para las notas que reproduce. La expan-conductores, la descarga entre materiales pronto ocurriría. Pero las prendas no sión o contracción de la flauta con la temperatura puede cambiar su tono, y por son conductoras y la carga permanece el tiempo suficiente como para que las tanto cambiar la afinación entre los instrumentos. 75. Cuando la cuerda del ropas con carga opuesta se atraigan eléctricamente y se peguen entre sí. 53. El piano se golpea, oscila no sólo en su modo fundamental de 220 Hz cuando está exceso de electrones frotado de tu cabello lo deja con una carga positiva; el exceso afinada, sino también en su segundo armónico a 440 Hz. Si la cuerda está desa-de electrones en el peine le da una carga negativa. 55. En tiempos antiguos, finada, este segundo armónico batirá contra el diapasón de 440 Hz. Para afinar antes de que los neumáticos de los camiones se hicieran conductores de electri-la cuerda escuchas estos batimientos

y luego aprietas o aflojas la cuerda hasta cidad, las carrocerías de los camiones solían arrastrar cadenas o alambres sobre la que el batimiento desaparece. 77. Cada uno percibe lo que se le ha enseñado superficie del camino. Su propósito era descargar cualquier carga que se hubiera

acumulado por la fricción con el aire y el camino. Los neumáticos conductores 11. Cuando la resistencia se duplica, la corriente se reduce a la mitad. 13. La de electricidad que se usan ahora impiden la acumulación de carga estática que humedad reduce la resistencia eléctrica de tu cuerpo. 15. Una batería produce pudiera producir una chispa, especialmente peligrosa para los camiones que trans-CD. Un generador usualmente produce CA. 17. Un diodo pasa corriente sólo portan carga inflamable. 57. Los rayos cósmicos producen iones en el aire, lo en una dirección. 19. El error es que ninguna partícula puede viajar con la cual ofrece una trayectoria conductora para la descarga de los objetos cargados.

rapidez de la luz. 21. La velocidad de deriva es la velocidad neta de los electro-Las partículas de rayos cósmicos que fluyen hacia abajo a través de la atmósfera son nes que constituyen una corriente eléctrica. 23. El error es que la fuente es los atenuadas por el decaimiento radiactivo y por absorción, de modo que la radiación mismos alambres conductores, no la fuente de poder. 25. Cuando recibes un y la ionización son más intensas a grandes altitudes que a bajas altitudes. 59. El choque, tu propio cuerpo es la fuente de los electrones, mas no la fuente de la cristal en su totalidad tiene carga neta cero, de modo que cualquier carga negativa energía impartida a ellos. 27. Un watt y un kilowatt son unidades de potencia.

en una parte se contrarresta con igual cantidad de carga positiva en otra parte.

Un kilowatt-hora es una unidad de energía. 29. La corriente es 1 A en cualquier De modo que la carga neta de los electrones negativos tiene la misma magnitud parte en dos lámparas conectadas en serie. 31. Ambas lámparas tienen 6 volts que la carga neta de los iones. (Este equilibrio de cargas positiva y negativa dentro a través de ellas cuando se conectan en paralelo. 33. Un fusible o un disyuntor del cristal es casi, aunque no precisamente, perfecto, porque el cristal puede ga-evitan la sobrecarga que puede producir un incendio.

nar o perder algunos electrones adicionales.) 61. Los electrones se desalojan con facilidad de las regiones exteriores de los átomos, pero los protones se mantienen Piensa y realiza

firmemente dentro del núcleo. 63. Los electrones son atraídos hacia los 50 mil 35. ¡Una actividad cerca de casa!

trillones de protones con carga positiva en los núcleos atómicos de los átomos en Sustituye y listo

la moneda. 65. La ley del inverso al cuadrado entra en juego aquí. A la mitad V

120 V

de la distancia el campo de fuerza eléctrica es cuatro veces más intenso; a un 37. I =

=

= 8 A.

R

15

cuarto de distancia, 16 veces más intenso; a cuatro veces la distancia, un dieciseisavo de intenso. 67. Duplicar una carga duplica la fuerza. La magnitud de la V

120 V

39. I =

=

= 0.5 A.

fuerza no depende del signo de la carga. 69. El enorme valor de la constante k R 240

para fuerza eléctrica indica una fuerza relativamente enorme entre cargas, compa-41. P 5 IV 5 (10 A)(120 V) 5 1,200 W.

rada con la pequeña fuerza gravitacional entre masas y el pequeño valor de la Piensa y resuelve

constante gravitacional G. 71. Por convención, la dirección va de positivo a ne-43. A partir de la fórmula potencia corriente voltaje, se tiene 60 watts gativo, como indica la flecha. 73. Desaparece la resistencia eléctrica. 75. Los 60 W

pararrayos son más altos con la finalidad de estar más cerca de las nubes, más cerca corriente 120 volts y corriente

= 0.5 A. 45. A partir de potencia

de los relámpagos. 77. Un átomo neutro en un campo eléctrico está eléctrica-120 V

potencia 1,200 W

mente distorsionado (consulta la Figura 22.11). Si el campo es suficientemente corriente voltaje, corriente

=

=

= 10 A. Entonces resis-

intenso, la distorsión resulta en una ionización, donde las cargas se desprenden voltaje

120 V

voltaje

120 V

unas de otras. Entonces los iones proporcionan una trayectoria conductora tencia

=

=

= 12 . 47. Primero, 100 watts 5 0.1 kilowatt.

para una corriente eléctrica. 79. Las partículas de pintura en la humedad se pola-corriente

10 A

rizan y, por tanto, son atraídas hacia la carrocería cargada del automóvil. 81. Las Segundo, en una semana hay 168 horas (7 días 24 horas/día 168 horas). De fuerzas sobre electrón y protón serán iguales en magnitud, pero opuestas en di-modo que 168 horas 0.1 kilowatt 16.8 kilowatt-hora, que a 15 centavos por rección. 83. Electrón y protón acelerarán en direcciones opuestas. 85. El kWh se convierte en $2.52. 49. La potencia de la plancha es P 5 IV 5 (110 V) electrón tendrá mayor rapidez en el impacto. La fuerza sobre ambos es la misma (9 A) 5 990 W 5 990 J/s. La energía térmica generada en 1 minuto es E 5 po-y la distancia es la misma, de modo que el trabajo realizado por el campo es el tencia tiempo 5 (990 J/s) (60 s) 5 59,400 J. 51. La resistencia del tostador mismo y la EC de las partículas es la misma. Pero para la misma EC, la partícula es R 5 V/I 5 (120 V)/(10 A) 5 12 Ω. De modo que, cuando se aplican 108 V, con menor masa, el electrón, tendrá mayor rapidez. 87. Los trozos de hilo se la corriente es I 5 V/R 5 (108 V)/(12 Ω) 5 9.0 A y la potencia es P 5 IV 5

polarizan en el campo eléctrico, con un extremo positivo y el otro negativo, y (9.0 A)(108 V) 5 972 W, sólo 81 por ciento de la potencia normal. (¿Puedes ver se convierten en contrapartes eléctricas de los polos norte y sur de la brújula la razón de este 81 por ciento? Corriente y voltaje disminuyen ambos en 10 por magnética. Fuerzas opuestas sobre el extremo de las fibras (o aguja de la brújula) ciento, y 0.9 3 0.9 5 0.81.)

producen momentos de torsión que orientan las fibras a lo largo de la dirección Piensa y clasifica

del campo (observa más adelante la Figura 24.3 en el Capítulo 24). 89. Su 53. A 5 B 5 C 55. A, B, C

cambio es 10 volts (10 joules por coulomb es 10 volts). 91. Voltaje (0.5 J)/0.001 C = 5,000 V. 93. Las cargas son de igual magnitud porque la Piensa y explica

carga tomada de una placa se cede a la otra. Por ello la carga neta de un capacitor 57. Un flujo sostenido necesita una diferencia sostenida en potencial a través siempre es cero. 95. Es peligroso porque el capacitor todavía puede estar car-de un medio conductor, debido a una batería o generador. 59. El flujo es de gado. 97. Cero, ya sea que la carga esté o no en el exterior. 99. De acuerdo 6 galones por minuto (10 4 6). 61. El sistema de enfriamiento de un con tu amigo. Los cabellos actúan como hojas en un electroscopio. Si tus brazos automóvil es más análogo a un circuito eléctrico porque

es un sistema cerrado y fuesen muy ligeros, también se pararían.

contiene una bomba, como la batería u otra fuente de voltaje en un circuito. La manguera de agua no recircula el agua como lo hace el sistema de enfriamiento del Piensa y discute

automóvil. 63. El circuito en el centro es un circuito completo y encenderá la 101. La envoltura cargada polariza muy bien el plástico no conductor en lugar del metal, lo que resulta en mejor adherencia sobre el plástico que sobre el me-lámpara. 65. Seis joules de energía se suministran a cada coulomb que pasa por tal.

una batería de 6 volts. 67. Tu tutor está equivocado. Un ampere mide corriente, 103. La moneda será un poco más masiva con una carga negativa porque tendrá más electrones que cuando es neutra. Si la moneda tuviera carga positiva, y un volt mide potencial eléctrico ("presión" eléctrica). Son conceptos totalmen-sería un poco más ligera debido a los electrones faltantes.

te diferentes: el voltaje produce amperes en un conductor. 69. No para ambas 105. La ley se escribiría

igual.

preguntas. La corriente fluye por los dispositivos eléctricos, tal como el agua fluye 107. El anillo a la mitad tiene mayor campo eléctrico en su centro porque el campo eléctrico en el centro del anillo completo se cancela. El campo eléctrico por un circuito de tuberías. Si una bomba de agua produce presión de agua, el en el centro del medio anillo se debe a una multitud de vectores eléctricos, con agua fluye tanto por la bomba como por el circuito. Lo mismo sucede con la co -

componentes verticales que se cancelan y componentes horizontales que se suman rriente eléctrica en un circuito eléctrico. Por ejemplo, en un circuito simple y producen un campo resultante que actúa en sentido horizontal hacia la derecha.

que consiste de una batería y una lámpara, la corriente eléctrica producida en la lámpara es la misma corriente eléctrica en los alambres que conectan la lám-Capítulo 23

para y la misma corriente eléctrica que fluye por la batería. La carga eléctrica Preguntas conceptuales

fluye por estos dispositivos (el flujo de carga es la corriente). 71. Tu

amigo 1. El calor debe tener una diferencia en temperatura. La carga debe tener una comparte voltaje de su batería al conectar las dos baterías en paralelo. 73. Si diferencia en potencial eléctrico. 3. Los electrones en los metales tienen libertad todo lo demás permanece igual, un material con trayectoria libre media corta para vagar, mientras que los protones están incrustados en los núcleos atómicos; ofrece más resistencia al flujo de electrones y tiene mayor resistencia eléctrica.

no tienen libertad para deambular. 5. Un tipo es una batería; otro es un gene-En todos los materiales, la aplicación de calor impone más caos molecular y rador. 7. La carga eléctrica fluye a través de un circuito. El voltaje no fluye en acorta la trayectoria aún más, lo que aumenta la resistencia en la mayoría de los absoluto, sino que se transmite a través del circuito. 9. Calentar un alambre materiales. Así que para alargar la trayectoria, sólo enfría el material. Las con- metálico aumenta el movimiento molecular y, por tanto, su resistencia eléctrica.

ductividades aumentan mucho en la mayoría de los materiales cuando se enfrían

RESPUESTAS A PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR

S-23

a bajas temperaturas. 75. Más de 90% de la energía eléctrica en una lámpara usarse la regla de "producto sobre suma" para encontrar la resistencia combinada: incandescente pasa directamente a calor. La energía térmica es el cementerio de la R 5 (R R)/(R R) 5 (6 12)/ (6 12) = 4 .

1

2

1

2

energía eléctrica. 77. Los alambres gruesos tienen menos resistencia y transpor-Capítulo 24

tan corrientes de un modo más efectivo sin un calentamiento excesivo. 79. El Preguntas conceptuales

filamento grueso tiene menos resistencia y extraerá (portará) más corriente que 1. Hans Christian Oersted, en una clase de bachillerato, advirtió cómo una un alambre delgado conectado a través de la misma diferencia de potencial.

corriente afecta un imán, relacionando así la electricidad y el magnetismo.

81. En el primer caso, la corriente atraviesa tu pecho; en el segundo caso, la 3. Los electrones en movimiento son la fuente de la fuerza magnética. 5. Los corriente sólo atraviesa tu brazo. Puedes cortarte el brazo y sobrevivir, pero no polos magnéticos no pueden aislarse; las cargas eléctricas sí pueden aislarse.

puedes sobrevivir sin el corazón. 83. Los faros de los automóviles están alambra-7. El movimiento de las cargas eléctricas produce un campo magnético. 9. Un dos en paralelo. Cuando uno se quema, el otro permanece encendido. Si alguna dominio magnético es un grupo de átomos alineados. 11. El hierro tiene do-vez has visto un automóvil con un faro quemado, tienes evidencia de que están minios magnéticos, la madera no. 13. El campo magnético adopta la forma de alambrados en paralelo. 85. (a) Volt, (b) ampere, (c) joule. 87. El voltaje a círculos concéntricos alrededor de un alambre que porta corriente. 15. Dentro través de ramas paralelas, cualquiera sea la resistencia, permanece igual. 89. La de la espira las líneas están más concentradas. 17. Un mayor flujo de electro -

señal es una broma. El voltaje alto puede ser peligroso, pero la resistencia alta nes produce una mayor intensidad de campo magnético. 19. La fuerza es es una propiedad de todos los no conductores. 91. En general el daño ocurre máxima cuando el movimiento es perpendicular al campo; mínima cuando

por el calentamiento excesivo cuando demasiada corriente se conduce a través de es paralelo al campo. 21. La fuerza es máxima cuando la corriente es perpendi-un electrodoméstico. 93. Cero. Las compañías eléctricas no venden electrones; cular al campo. 23. Cuando se calibra para la corriente, un galvanómetro es un venden energía. Cualquiera que sea el número de electrones que fluya hacia una amperímetro; cuando se calibra para el voltaje, un voltímetro. 25. Sí. Un mo-casa, el mismo número fluye hacia afuera. 95. La energía eléctrica se propaga a tor es un galvanómetro complicado. 27. Las inversiones del polo magnético través de un circuito mediante campos eléctricos que se mueven cerca de la rapi-son inversiones de los polos norte y sur, comunes a lo largo de toda la

historia de dez de la luz, no por colisiones de electrones. El sonido, por otra parte, viaja por la Tierra. 29. Seis criaturas son bacterias, palomas, abejas, mariposas, tortugas colisiones moleculares o atómicas, un proceso mucho más lento. 97. El brillo marinas y peces.

permanece igual. 99. La bombilla C es la más brillante porque el voltaje a través de ella es igual a la de la batería. Las bombillas A y B comparten el voltaje de la Piensa y realiza

rama paralela del circuito y tienen la mitad de la corriente de la bombilla C (si 31. Una actividad que vale la pena.

supones que las resistencias son independientes de los voltajes). Si la bombilla A Piensa y explica

se desatornilla, la rama superior ya no es parte del circuito y la corriente cesa tanto 33. La separación es sencilla con un imán (¡inténtalo y sorpréndete!). 35. La ma-en A como en B. Ya no proporcionan luz, mientras que la bombilla C brilla como nera en que se mueve la carga dicta la dirección de su campo magnético. (Un cam-antes. Si en vez de ello se desatornilla la bombilla C, entonces sale y las bombillas po magnético es una cantidad vectorial.) Los campos magnéticos se cancelan, más A y B brillan como antes. 101. La corriente de línea disminuye conforme se en algunos materiales que en otros. 37. Ocurrirá atracción porque el imán indu-conectan más dispositivos en serie. Pero la corriente de línea aumenta a medida ce una polaridad opuesta en un trozo cercano de hierro. El norte inducirá sur, y el que más dispositivos se conectan en paralelo. Esto se debe a que la resistencia del sur inducirá norte. Esto es similar a la inducción de carga, donde un globo se pega-circuito aumenta cuando se agregan dispositivos en serie, pero disminuye (más rá a una pared ya sea que el globo tenga carga positiva o negativa. 39. Los polos rutas) cuando los dispositivos se agregan en paralelo. 103. Todos son iguales del imán se atraen entre sí y hacen que el imán se doble, incluso lo suficiente para para resistores idénticos en serie. Si los resistores no son iguales, entonces el de que los polos se toquen si el material es suficientemente flexible. 41. Los imanes mayor resistencia tiene menos voltaje a través de sí y menos potencia disipada en de refrigerador tienen tiras estrechas de polos norte y sur alternados. Estos ima -

él. Sin embargo, sin importar las resistencias, la corriente a través de ambos es la nes son suficientemente fuertes como para sostener hojas de papel contra la puerta misma. 105. Sí. Habrá una disminución en el brillo cuando demasiadas lámpa-de un refrigerador, pero tienen

un rango muy corto porque los polos norte y sur ras se conecten en paralelo debido al aumento de corriente que fluye por la batería.

se cancelan a poca distancia de la superficie magnética. 43. Un imán inducirá la La caída interna de voltaje aumenta con la corriente en la batería, lo cual significa alineación de los dominios magnéticos de un clavo o un clip. Los polos opuestos que se suministra un voltaje reducido en sus terminales al circuito que alimenta.

en el imán y el objeto de hierro están entonces más cerca unos de otros y resulta (Si el circuito en paralelo se alimenta con una fuente más intensa, como el que una atracción (eso es similar a un peine cargado que atrae pedazos de papel eléc-proporciona la compañía eléctrica por los tomacorrientes comunes de pared, no tricamente neutro; consulta la Figura 22.13). Un lápiz de madera, por otra parte, se verán bombillas atenuadas conforme se agreguen más rutas paralelas.) 107. Un no tiene dominios magnéticos que interactúen con un imán. 45. Los dominios fusible en serie con cualquiera de los aparatos podría ser útil porque se fundiría en el clip son inducidos a alinearse en una forma similar a la polarización de carga sólo si algo saliera mal con dicho aparato particular.

eléctrica en un aislante cuando un objeto cargado se acerca. Cualquier polo de un imán inducirá una alineación de dominios en el clip: resulta atracción porque el Piensa y discute

polo de los dominios alineados que está más cerca al polo del imán siempre es 109. Un resistor no "atrae" o "extrae" la corriente, tal como una tubería en un el polo opuesto. 47. El mecanismo de alineación comprende dos factores. Pri-circuito de plomería no "extrae" agua. Más bien, "permite" o "facilita" el paso mero, cada limadura se convierte en un pequeño imán por el campo magnético de corriente cuando a través de él se establece una presión eléctrica. 111. La del imán de barra, que induce una alineación de dominios en la limadura. Se -

resistencia equivalente de los resistores en serie es su suma, de modo que conecta gundo, un par de momentos de torsión iguales y opuestos actúan sobre cada un par de resistores en serie para una mayor resistencia. 113. Una bombilla se limadura siempre que no esté paralela a las líneas del campo magnético. Estos quema cuando el filamento se rompe o cuando se desintegra o se separa. 115.

momentos de torsión giran las limaduras hasta alinearlas con las líneas del campo De acuerdo, porque incluso para el resistor más

pequeño, la corriente tiene como pequeñas agujas de brújula. 49. Sí. La brújula se alinea con el campo mag-una trayectoria alternativa, lo que constituye una resistencia global más peque-nético de la Tierra, que se extiende del polo magnético en el hemisferio sur al polo ña. 117. Puede conectar cuatro resistores de 40 ohm en paralelo. 119. La magnético en el hemisferio norte. 51. ¡De vuelta a la tercera ley de Newton!

bombilla de 100 watts tiene el filamento más grueso y la resistencia más baja, Los imanes A y B se jalan por igual uno a otro. Si A jala sobre B con 50 newtons, de modo que en serie, donde la corriente es la misma en cada bombilla, menos entonces B también jala sobre A con 50 newtons. ¡Punto! 53. De nuevo la ter-energía se disipa al pasar por la resistencia más baja. Esto corresponde a un me-cera ley de Newton: sí, el clip, como parte de la interacción, sin duda ejerce una nor voltaje a través de la resistencia —una menor caída de voltaje—. De este fuerza sobre el imán, tanta como el imán jala sobre él. El imán y el clip jalan por modo, la mayor caída de voltaje será a través de la bombilla de 60 watts en se-igual uno sobre otro para constituir la interacción individual entre ellos. 55. Las rie. Es interesante que, ¡la bombilla de 60 watts en serie sea más brillante que la vibraciones tanto en la bobina como en el cono de la bocina tienen frecuencias bombilla de 100 watts! Cuando la bombilla se conecta en paralelo, el voltaje a idénticas en cualquier instante. 57. Así como como un clavo se magnetiza al través de cada bombilla es el mismo, y la corriente es mayor en la bombilla de golpearlo, un barco de hierro se golpea en su fabricación, lo que lo convierte en 100 watts con la resistencia más baja, la cual será más brillante que la bombilla un imán permanente. Su orientación magnética inicial, que es un factor en poste-de 60 watts. 121. (a) Por la ley de Ohm, la corriente en el resistor de 6 ohm riores mediciones magnéticas, en efecto se registra en la placa de bronce. 59. Un es V/ R 5 12 V/6 5 2 A. (b) Los otros dos resistores, en serie, suman electrón debe moverse por las líneas de un campo magnético a fin de percibir 12 ohms, de modo que la corriente en ellos es 12 V/12 5 1 A. (c) La corriente una fuerza magnética. De modo que un electrón en reposo en un campo magen la fuente de voltaje es la corriente total: 2 A 1 A 5 3 A. (d) Dos formas nético estacionario no sentirá ninguna fuerza que lo ponga en movimiento. Sin de encontrar R : (1) A partir de I 5 V/ R , R 5 V/ I 5 12 V/3 A 5 4 .

embargo, en un campo eléctrico, un electrón puede acelerar ya sea que esté o eq

total

eq

eq

total

(2) Debido a que el circuito tiene 6 ohms en paralelo con 12 ohms, puede no en movimiento. (Una combinación de campos magnético y eléctrico se usa

en aceleradores de partículas, como los ciclotrones. El campo eléctrico acelera la Piensa y realiza

partícula cargada en su dirección, y el campo magnético la acelera perpendicular 31. Respuesta abierta. 33. Las latas contienen hierro. Los dominios en la lata a su dirección.) 61. Si las partículas entran al campo moviéndose en la misma tienden a alinearse con el campo magnético de la Tierra. Cuando las latas se dejan dirección y se desvían en direcciones opuestas (por decir, una a la izquierda y otra estacionarias durante varios días, las latas se magnetizan por inducción, y se alia la derecha), las cargas deben ser de signo opuesto. 63. Si el campo interac-nean con el campo magnético de la Tierra.

túa con un imán de barra estacionario, es magnético; si lo hace con una carga Sustituye y listo

estacionaria, es eléctrico. Si se genera una corriente eléctrica al girar la espira de 120 V

x V

120 V

alambre, el campo es magnético. Si una fuerza actúa sólo sobre una carga en 35.

=

, donde x = (10 vueltas)×

=1,200 V.

movimiento, el campo es magnético. De modo que cualquiera de las clases de 10 vueltas 100 vueltas

10 vueltas

experimentos que traten con una carga eléctrica en reposo y una carga eléctrica en Piensa y resuelve

movimiento puede servir para determinar la naturaleza del campo en la habita-120 V

6 V

6 V

ción. 65. Los cinturones de radiación Van Allen están llenos con enjambres de 37.

=

, x vueltas = 500 vueltas ×

= 25 vueltas.

500 vueltas x vueltas

120 V

partículas cargadas de alta energía que pueden lesionar el tejido vivo. Por tanto, 39. A partir de la relación del transformador,

los astronautas se esfuerzan por mantenerse abajo de estos cinturones. 67. Los iones cargados en forma individual que viajan con la misma rapidez a través del voltaje primario

=

voltaje secundario

= 120 V = 5.

mismo campo magnético experimentan la misma fuerza magnética. La medida número de vueltas primario número de vuelas secundario

24 V

1

de sus desviaciones depende de sus aceleraciones, las cuales a su vez dependen de De modo que hay cinco veces más vueltas primarias que vueltas secundarias.

sus respectivas masas. Los iones menos masivos se desvían más, y los más masivos 41. El transformador sube voltaje por el factor 36/6 5 6. Por tanto, una entrada se desvían menos. (Consulta en la Figura 34.14 del Capítulo 34 un diagrama de 12 V subiría a 6 3 1 V 5 72 V. 43. El voltaje de subida es (12,000 V)/

de un espectrógrafo de masas.) 69. Para determinar sólo por sus interacciones (120 V) 5 100. De modo que debería haber 100 veces más vueltas en la secun-mutuas cuál de dos barras es un imán, coloca el extremo de la barra 1 en el punto daria en comparación con la primaria.

medio de la barra 2 (como formando una "T"). Si existe una atracción, entonces Piensa y clasifica

la barra 1 es el imán. Si no hay atracción, entonces la barra 2 es el imán. 71. Sí.

45. B, C, A

Cada uno experimentará una fuerza porque cada uno está en el campo magnético generado por el otro. Es interesante que las corrientes en la misma dirección se Piensa y explica

atraigan y las corrientes en direcciones opuestas se repelan. 73. Las corrientes 47. La inducción electromagnética requiere cambio, ya sea de la intensidad de un son inducidas en los metales por el campo magnético variable del aparato IRM.

campo magnético o del movimiento en un campo magnético. 49. Los dominios magnéticos que se alinean en el núcleo de hierro contribuyen al campo magnético Piensa y discute

global de la bobina y, por tanto, aumentan su inducción magnética. 51. Debe 75. La aguja de inclinación apuntará casi verticalmente cerca de los polos mag-realizarse trabajo para mover un conductor que porta corriente en un campo magnéticos de la Tierra, donde el campo apunta hacia o desde los polos (que están nético. Esto sucede ya sea que la corriente se produzca de manera externa o como enterrados profundo bajo la superficie). Apuntará casi horizontalmente cerca del resultado de la inducción que acompaña al movimiento del alambre en el campo.

ecuador (observa la Figura 24.20). 77. La fuerza neta sobre la aguja de una También es cuestión de conservación de energía. Debe haber más entrada de ener-brújula es cero porque sus polos norte y sur son jalados en direcciones opues-gía si hay más salida de energía. 53. Un ciclista viajará más lejos si la lámpara se tas con iguales fuerzas en el campo magnético de la Tierra. Cuando la aguja no desconecta del generador. La energía que se usa para activar la lámpara se toma está alineada con el campo magnético de la Tierra, entonces se produce un par de la energía cinética de la bicicleta, de modo que la bicicleta frena. El trabajo de momentos de torsión (con respecto al centro de la brújula; consulta la Figu-ahorrado al no encender la lámpara será la "fuerza 3 distancia" adicional que ra 24.3). Este par de momentos de torsión con igual intensidad, llamado "par", permita a la bicicleta viajar más lejos. 55. Las corrientes parásitas inducidas en gira la aguja para alinearse con el campo magnético de la Tierra. 79. El campo el metal cambian el campo magnético, que a su vez cambia la corriente CA en las eléctrico en un ciclotrón o cualquier acelerador de partículas cargadas fuerza a bobinas y dispara una alarma. 57. En ambos casos la dirección de la fuerza mag-las partículas hacia mayores rapideces, mientras que el campo magnético fuerza nética es perpendicular al campo magnético y el movimiento de cargas, pero con a las partículas en trayectorias curvas. Una fuerza magnética sólo puede cambiar diferentes resultados. En el efecto motor, la fuerza magnética empuja el alambre la dirección (no la rapidez) de una partícula cargada, porque la fuerza siempre hacia arriba. En el efecto generador, el alambre es empujado hacia abajo y la fuerza es perpendicular a la velocidad instantánea de la partícula. (Es muy interesante magnética empuja electrones en una dirección a lo largo del alambre para producir que, en un acelerador llamado betatrón, el campo eléctrico se produzca con un una corriente. 59. De acuerdo con tu amigo. Cualquier bobina de alambre que campo magnético variable.) 81. Sí. Asociado a cada partícula cargada en movi-gire en un campo magnético que corta a través de las líneas de campo magnético miento (electrones, protones o cualquier cosa) hay un campo magnético. Dado es un generador. 61. En concordancia con la inducción electromagnética, si el que un campo magnético no es exclusivo de los electrones en movimiento, tam-campo magnético alterna en el agujero del anillo, se induce un voltaje alterno en bién hay un campo magnético en torno a los protones en movimiento. Sin em-el anillo. Puesto que el anillo es metálico, su resistencia relativamente baja resul -

bargo, difiere en dirección. Las líneas de campo en torno al haz de

protones dan ta en una corriente alterna correspondientemente alta. Esta corriente es evidente vueltas en una dirección, y las líneas de campo en torno a un haz de electrones lo en el calentamiento del anillo. 63. El electroimán es CA, lo cual significa un hacen en la dirección opuesta. (Los físicos usan una "regla de la mano derecha": si campo magnético que cambia de manera continua en el anillo de cobre. Esto el pulgar derecho apunta en la dirección de movimiento de una partícula positiva, induce una corriente en el anillo, que entonces se convierte en su propio elec-los dedos curvados de dicha mano muestran la dirección del campo magnético.

troimán, que es repelido de manera continua por el electroimán grande. La fuerza Para partículas negativas puede usarse la mano izquierda.)

de repulsión es igual al peso del anillo, lo que produce un equilibrio mecánico. 65. Dado que toda la resistencia eléctrica en este caso es simplemente la Capítulo 25

del alambre en sí (sin otra carga externa), el doble de la longitud de alambre sig-Preguntas conceptuales

nifica el doble de resistencia. De modo que, aunque el doble de espiras significa 1. Cada quien por su cuenta, ambos descubrieron la inducción electromagné-el doble de voltaje, el doble de resistencia resulta en la misma corriente. 67. El tica. 3. El voltaje inducido en una bobina es proporcional al producto de su núcleo de hierro aumenta el campo magnético de la bobina primaria, como se número de espiras, al área transversal de cada espira y a la tasa a la que cambia enuncia en la respuesta a la pregunta 49. El campo más intenso significa un mayor el campo magnético dentro de dichas espiras. 5. Ambas frecuencias son igua-cambio de campo magnético en el primario y un mayor voltaje inducido en el les. 7. La corriente es CA porque el voltaje inducido es CA. 9. Faraday y secundario. El núcleo de hierro en el secundario aumenta aún más el campo mag-Henry hicieron el descubrimiento; Tesla lo puso en práctica. 11. En general, nético variable a través del secundario y aumenta aún más el voltaje secundario.

el vapor suministra energía a una turbina. 13. Un generador MHD no tiene Más todavía: el núcleo guía más líneas de campo magnético del el primario al partes móviles. 15. Potencia es la tasa a la que se transfiere energía. 17. Un secundario. El efecto de un núcleo de hierro en las bobinas es la inducción de mu-transformador cambia el voltaje y la corriente, pero no la energía y la poten-cho más voltaje

en el secundario. 69. Cuando el voltaje secundario es doble que cia. 19. Un transformador reductor reduce el voltaje. 21. La operación de el voltaje primario, y el secundario actúa como fuente de voltaje para una "carga"

un transformador depende del cambio, en consecuencia de la corriente alterna, o resistiva, la corriente secundaria tiene la mitad del valor de la corriente en el pri-CA. 23. Sí. A esto se le llama autoinducción. 25. No se necesitan alambres.

mario. Esto está en concordancia con la conservación de la energía o, debido a que Los dispositivos electrónicos personales lo demuestran. 27. Se induce un cam-los intervalos de tiempo para cada uno son iguales, la "conservación de potencia".

po eléctrico alterno. 29. ¡No se necesitan alambres!

RESPUESTAS A PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR

S-25

Entrada de potencia salida de potencia; o (corriente voltaje)

(corrien-

Piensa y resuelve

primario

te voltaje)

; con valores numéricos,(1 V)

(1/2 2 V)

.

distancia 300,000,000 km

secundario

primario

secundario

33. Rapidez

=

231,000 km/s. Este valor es

(La fórmula simple potencia corriente voltaje es estrictamente válida sólo tiempo

1,300 s

para circuitos CD y circuitos CA donde la corriente y el voltaje oscilen en fase.

d

Cuando el voltaje y la corriente están fuera de fase, lo que puede ocurrir en un 77 por ciento del valor moderno. 35. A partir de v = , se tiene t

transformador, la potencia neta es menor que el producto corriente voltaje. En-d

d 1.5 ×1011m

tonces el voltaje y la corriente no "funcionan en conjunto". Cuando el secundario t = = =

= 500 s (que es igual a 8.3 min). El tiempo para cruzar

v

c

3 ×108m/s

de un transformador está abierto, por ejemplo, conectado a nada, la corriente y el el diámetro de la órbita terrestre es el doble de esto, o 1,000 s, como estimó muy voltaje tanto en el primario como en el secundario están completamente fuera de cercanamente Roemer (consulta la pregunta 33).

fase; esto es, uno es máximo cuando el otro es cero, y no se suministra potencia d

4.2 × 16

neta aun cuando ni el voltaje ni la corriente sean cero.) 71. Un transformador 10 m

37. Se tiene t = =

= 1.4 ×108 s.. Al convertir a años mediante aná-

8

elevador multiplica voltaje en el secundario al tener más vueltas en la bobina se-v

3 ×10 m/s

cundaria que en la bobina primaria. Un transformador reductor hace lo contrario: lisis dimensional, se obtiene 1.4×108 s× 1 h × 1 día × 1 año 5 4.4 años.

menos vueltas en el secundario, lo que reduce el voltaje en el secundario. 73. El 3,600 s 24 h 365 días

nombre del juego en el electromagnetismo es cambio: si no hay cambio, no 39. (a) Frecuencia 5 rapidez/longitud de onda 5 (3 3 108 m/s)/(0.03 m) 5

hay inducción. La corriente alterna cambia de dirección, usualmente a 60 Hz.

1.0 3 1010 Hz 5 10 GHz. (b) Distancia = rapidez 3 tiempo, de modo que 75. Existe un espacio físico entre las dos. Sin embargo, están unidas por campos tiempo 5 distancia/rapidez 5 (10,000 m)/ (3 3 108 m/s) 5 3.3 3 10–5 s. (Ob-magnéticos variables: el mismo en cada bobina. 77. ¡Ups! Éste es un circuito serva la importancia de usar unidades SI consistentes para obtener las respuestas CD. A menos que haya una corriente variable en el primario, no se produce in-numéricas correctas.)

ducción. En el medidor no se inducen ni voltaje ni corriente. 79. No, no, no, Piensa y explica

¡mil veces no! Ningún dispositivo puede incrementar la energía. Este principio está 41. Tu amigo está en lo correcto. También con un tono profundo, ¡tu amigo en el corazón de la física. La energía no puede crearse ni destruirse. 81. La fuente podría decir que el sonido es la única cosa que escuchamos! 43. La fuente de una onda electromagnética es una carga eléctrica oscilatoria. 83. La onda de fundamental de radiación electromagnética son cargas eléctricas en oscilación, radio incidente hace que oscilen los electrones de conducción en la antena. Esta que emiten campos eléctricos y

magnéticos oscilatorios. 45. El ultravioleta tiene carga oscilatoria (una corriente oscilatoria) proporciona la señal que alimenta al longitudes de onda más cortas que el infrarrojo. En correspondencia, el ultra-radio. 85. De acuerdo con tu amigo. La luz es radiación electromagnética que violeta tiene frecuencias más altas. 47. Lo que ondula en una onda de luz son tiene una frecuencia que coincide con la frecuencia a la cual son sensibles tus ojos.

los campos eléctrico y magnético. Su frecuencia de oscilación es la frecuencia de Piensa y discute

la onda. 49. La rapidez es c, la rapidez de la luz. 51. De acuerdo. Ambas son 87. Los alambres de cobre no estaban aislados en la época de Henry. Una bobina de ondas electromagnéticas. 53. De acuerdo. Las ondas electromagnéticas están en alambres no aislados que se tocan entre sí crearía un cortocircuito. Se usaba seda para todas partes. 55. La onda más rápida tiene la longitud de onda más larga: la luz, aislar los alambres y que la corriente fluyera por los alambres en la bobina y no por en concordancia con la regla v/ f. 57. Las ondas de radio son ondas elec-las espiras que se tocan unas a otras. 89. En los devanados del motor eléctrico que tromagnéticas y viajan con la rapidez de la luz. (¡No confundas las ondas sonoras impulsa una sierra suceden dos cosas. La entrada de corriente los hace dar vueltas y con las ondas de radio!) 59. La longitud de onda más corta corresponde a una tú tienes un motor. Pero el movimiento de los devanados en el campo magnético frecuencia más alta, de modo que la frecuencia de la luz azul-verdosa proveniente del motor también los convierte en un generador. La corriente neta en el motor del láser de argón tiene una frecuencia más alta que la luz roja proveniente del es la corriente de entrada menos la corriente de salida generada, que es opuesta en láser helio-neón. 61. El vidrio es opaco a frecuencias de luz que coinciden con dirección a la corriente de entrada. Tú pagas a la compañía eléctrica por la corriente sus propias frecuencias naturales. Esto se debe a que los electrones en el medio neta. Cuando el motor se atasca, la corriente neta aumenta debido a la ausencia de absorbente son impulsados a oscilaciones de amplitudes mucho más grandes que corriente generada. ¡Esto puede quemar los devanados de la sierra! 91. Conforme ocurren para frecuencias no resonantes. Estas amplitudes grandes resultan en una el imán cae, induce una corriente que da vueltas en la tubería conductora y se acom-transferencia de energía a átomos vecinos y un aumento en energía interna y no paña por su propio campo magnético. El imán en movimiento es frenado por la in-en una reemisión de luz. 63. Transparencia u opacidad están determinados por teracción con este campo inducido. 93. El movimiento de las

hojas conductoras a la coincidencia entre las frecuencias de la luz incidente y la frecuencia resonante través de un campo magnético induce corrientes arremolinadas (corrientes parásitas) del material. Una sustancia que es transparente a un rango de frecuencias de luz con campos que interactúan con el imán y frenan el movimiento. Esto no ocurre en es opaca en aquellas frecuencias que coinciden con su propia frecuencia reso-el cartón no conductor. 95. A través de las alas del avión en movimiento se induce nante. 65. Las gafas de Sol se calentarán más en la luz solar que las gafas de una diferencia de voltaje. Esto produce una corriente momentánea, y en las puntas lectura regulares porque las gafas para leer transmiten la mayor parte de la ener-del ala se acumula carga para crear una diferencia de voltaje que contrarresta la dife-gía luminosa que incide sobre ellas, mientras que las gafas de Sol absorben más rencia de voltaje inducida. De modo que la carga se distribuye de manera equitativa energía luminosa, lo que en consecuencia aumenta su energía interna. 67. Los en ambas direcciones y no se mueve.

bastones, no los conos, responden a la luz débil, de modo que debes enfocar la Capítulo 26

luz con baja intensidad sobre una parte de la retina que está compuesta de bas-Preguntas conceptuales

tones. Ésa estaría al lado de la fóvea. Si observas una estrella tenue, mira un poco 1. Un campo magnético variable induce un campo eléctrico variable. 3. Una al lado de donde esperas verla. 69. No se ve color en la periferia de la visión onda electromagnética se produce mediante campos eléctrico y magnético vibrato-simplemente porque no hay conos ubicados en las regiones más externas de la rios. 5. Si la onda acelerara, habría mayor regeneración de ondas y la energía au-retina. 71. El punto ciego se ubica en el lado de la fóvea alejado de tu nariz.

mentaría. Por tanto, esto no ocurre. 7. La principal diferencia entre las ondas de 73. En concordancia con la ley del inverso al cuadrado, el brillo del Sol es menor radio, la luz y los rayos X es la frecuencia. 9. El rojo es el color de las frecuencias que 1/25 del visto desde la Tierra. 75. Ves la galaxia como "estaba" cuando la más bajas; el violeta, el de las frecuencias más altas. 11. Frecuencias más altas de luz la dejó, hace mucho, mucho tiempo. 77. En la tabla de factores de conver-luz tienen longitudes de onda más cortas. 13. En primer lugar, el espacio exterior sión de los forros del libro, observa que 1 ft = 0.3048 m, de modo que 20 pies es está lleno de ondas electromagnéticas. 15. La frecuencia resonante del vidrio está 20

0.3048 m = 6.096 m. En el sistema métrico podrías esperar "visión 6/6"

en la región ultravioleta. 17. La energía de la luz visible se transmite a través del (redondeado).

vidrio y sale del otro lado. 19. Las frecuencias son iguales. 21. Las rapideces Piensa y discute

de la luz incidente y saliente son iguales. 23. La luz se absorbe y se transforma en 79. Puedes ver el Sol y las estrellas. 81. El hecho de que las diferentes partes del energía térmica. 25. Múltiples reflexiones absorben luz, y la luz que sale es más espectro electromagnético emitidas en la explosión se reciban de forma simultá-débil. 27. Todos los objetos en la luz solar proyectan sombras, de modo que, sí, la nea es evidencia de la independencia de frecuencia de la rapidez de la luz. Si la Tierra y la Luna siempre proyectan sombras. Cuando el Sol y la Luna pasan dentro rapidez de onda dependiera de la frecuencia, se recibirían diferentes frecuencias de la sombra del otro, hay un eclipse. 29. Los objetos de la periferia se ven mejor en distintos tiempos. 83. Caminar por una habitación y detenerse para saludar cuando se mueven.

a otros es análogo al modelo de transmisión de la luz en que hay una pausa con Piensa y realiza

cada interacción. Sin embargo, la misma persona que comienza el camino termi-31. Puede sorprenderte descubrir que el tamaño de la Luna en el cielo es el mismo na el camino, mientras que en la transmisión de luz hay una secuencia de eventos ya sea que esté baja o alta en el firmamento, aun cuando a simple vista la Luna

"muerte-nacimiento" conforme la luz es absorbida y "nueva luz" es emitida en su parezca más grande más cerca del horizonte. La explicación es fisiológica.

lugar. La luz que al principio golpea el vidrio no es la misma luz que sale al final.

(Otra analogía es una carrera de relevos, donde el corredor que comienza la actividades de los humanos y otras formas de vida que colocan polvo y otras partícu-carrera no es el corredor que cruza la

línea de meta.) 85. Sí. La evidencia es las en el aire. De modo que la composición del cielo es más variada al atardecer.

un eclipse lunar, cuando la Luna pasa en la sombra de la Tierra. 87. Durante un Piensa y discute

eclipse parcial donde se proyectan los crecientes del Sol, la Luna está parcialmente 71. El cliente tiene razón cuando pide ver los colores a la luz del día. Bajo una en frente del Sol. 89. La Luna está más alejada de su distancia promedio de la iluminación fluorescente, con sus frecuencias predominantemente más altas, se Tierra, de modo que es más pequeña en el cielo. Si estuviera más cerca, la Luna acentuarían los colores azulados más que los colores rojizos. Los colores parecen se vería más grande y el Sol se bloquearía por completo cuando la Luna, el Sol y muy diferentes en la luz solar. 73. Los pétalos rojos de una rosa roja reflejan luz la Tierra se alinearan. 91. Durante un eclipse lunar, los observadores en la Luna roja, mientras que las hojas verdes absorben luz roja. La energía absorbida por las verían la Tierra en la trayectoria de la luz solar y verían un eclipse solar. Duran-hojas tiende a aumentar su temperatura. Los materiales blancos reflejan radiación te un eclipse solar, los observadores en la Luna verían una pequeña sombra de y, por tanto, lo usan quienes no quieren calentarse con la absorción de energía ra-la Luna moverse con lentitud por toda la Tierra. La sombra consistiría en una diante. 75. No sólo se ve amarillo-verde, sino también rojo y azul. Todos juntos, mancha oscura (la umbra) rodeada por un círculo no tan oscuro (la penumbra).

se mezclan para producir la luz blanca que ves. Y, debido a dispersión atmosférica, 93. La luz proveniente del flash se dispersa vía la ley del inverso al cuadrado hacia el Sol es amarillento. 77. De acuerdo, porque la "matemática de la luz" es correc-el suelo abajo, y lo poco que regresa al avión se dispersa aún más. El pasajero ta. 79. Ves los colores complementarios por la fatiga de la retina. El azul parecerá descubrirá que el flash no representa ninguna diferencia en absoluto. Tomar foto-amarillo; el rojo, cian; y el blanco, negro. ¡Pruébalo y verás! 81. A mayores alti-grafías a grandes distancias, ya sea desde un avión o desde las gradas de un esta -

tudes, hay menos moléculas sobre ti y, por tanto, menos dispersión de la luz solar.

dio de fútbol, con el flash intencionalmente activado, es más bien ridículo.

Esto resulta en un cielo más oscuro. El extremo, cuando no hay ninguna molécula Capítulo 27

en absoluto, resulta en un cielo negro, como en la Luna. 83. Desde la superficie Preguntas conceptuales

de la Luna, tanto el Sol como las estrellas son claramente visibles. Esto se debe a 1. La luz azul tiene una frecuencia más alta que la luz roja. 3. Cuando la luz que no hay luz del cielo (luz solar dispersada) que supere la luz de las estrellas.

cae sobre un material con una frecuencia natural coincidente, se absorbe. 5.

Capítulo 28

La luz roja se transmite a través de un vidrio rojo. 7. Un trozo de vidrio de color absorbe luz y se calienta más rápido. 9. La frecuencia pico de la luz so-Preguntas conceptuales

lar es amarillo-verde. 11. Una curva de radiación es una gráfica de brillo versus 1. La luz incidente pone a vibrar a los electrones. 3. El principio de Fermat frecuencia para la luz. 13. Estos tres colores de igual brillantez se suman para afirma que la luz tomará la trayectoria que requiera menos tiempo cuando vaya producir blanco. 15. Rojo y cian se suman para producir blanco. 17. Los tres de un punto a otro. 5. La distancia de la imagen y la distancia del objeto son primarios sus tractivos son cian, amarillo y magenta (CYM). 19. Las campa -

iguales. 7. Sí. Una superficie puede considerarse pulida para ondas con longitud nas pequeñas interactúan más con sonidos de frecuencia alta. 21. El cielo suele de onda corta y no para las de onda más larga. La malla en un disco parabólico parecer azul porque el extremo azul del espectro se dispersa más por la luz so-es rugosa para ondas cortas, pero no para ondas largas. 9. Los ángulos no son lar. 23. La dispersión de luz azul de frecuencia alta ocurre en toda la trayectoria iguales cuando las caras del vidrio no son paralelas, como con un prisma. 11. Sí.

de la luz solar, de modo que la trayectoria larga al amanecer o al atardecer encuen-La ley de reflexión se sostiene localmente en cada parte diminuta de la superficie tra mucho azul faltante. Lo que queda es luz con frecuencias más bajas, lo cual curva, pero no en el espejo curvo como totalidad. 13. La interacción de la luz explica el color rojizo del Sol en esos momentos. A mediodía la trayectoria a

través con un material transparente reduce la rapidez de la luz en el material. 15. La de la atmósfera es más corta y ocurre menos dispersión. 25. Una nube es blanca rapidez de la luz frena cuando la luz se refracta en un medio. 17. La refracción porque refleja por igual todos los colores de la luz solar. 27. El agua absorbe más hace que el fondo de la alberca parezca menos profundo. 19. Cada gota dis-la luz infrarroja. 29. Cuando el rojo no se resta, el resultado es cian.

persa un espectro de colores. 21. Un arco secundario es más tenue debido a la reflexión interna adicional. 23. Dentro del vidrio, la luz se refleja internamente Piensa y realiza

por completo, más o menos a 43, dependiendo del tipo de vidrio; en un dia-31. ¡Intenta esto con la bandera estadounidense! 33. ¡Esto fascinará a los mante, 24.5. 25. Una lente convergente es más gruesa en medio, lo que hace escépticos!

que los rayos paralelos se junten en un punto. Una lente divergente es más gruesa Piensa y explica

en los bordes. 27. Una imagen real puede proyectarse sobre una pantalla; una 35. El rojo tiene la longitud de onda más larga; el violeta tiene la longitud de onda imagen virtual no puede proyectarse. 29. Las pupilas pequeñas significan aber-más corta. 37. El recubrimiento interior absorbe en lugar de reflejar la luz y por turas pequeñas, lo cual significa menos traslape de rayos fuera de foco.

tanto parece negro. Un interior negro en un instrumento óptico absorberá cualquier Piensa y realiza

luz aislada en lugar de reflejarla y pasarla al interior del instrumento para interfe -

31. Muchas abuelas no saben que sólo con un espejo de la mitad del tamaño rir con la imagen óptica. 39. Las pelotas de tenis son amarillo-verde para vol-pueden ver su imagen completa. 33. Ésta es una actividad fascinante. 35. Ésta verse más visibles; así coinciden con el color al cual son más sensibles las personas.

es una actividad fascinante.

41. Un trozo de papel que parezca blanco en la luz solar tiene la propiedad de Piensa y resuelve

reflejar cualquier color que incida sobre él. 43. Si el vestuario amarillo de los ac-37. Te aproximas a 4 m/s. Tú y tu imagen caminan a 2 m/s. 39. La imagen de la tores se ilumina con una luz azul complementaria, parecerá negro. 45. Rojo y mariposa está a 20 cm detrás del espejo, de modo que la distancia entre la imagen verde producen amarillo; rojo y azul producen magenta; rojo, azul y verde producen y tu ojo es 70 cm. 41. La cantidad de luz transmitida a través de dos hojas de blanco. 47. Anaranjado-amarillo es complementario al azul, que se combinan a vidrio es aproximadamente 85%. Para ver esto, considera una intensidad incidente negro. Los automóviles serían difíciles de ver bajo esta luz. 49. Se verá morado.

de 100 unidades. Entonces 92 unidades se transmiten a través del primer panel, y Revisa la Figura 27.12. 51. Profundo en el agua el rojo ya no está presente en la 92% de esta cantidad se transmite a través del segundo panel (0.92 3 92 5 84.6).

luz, de modo que la sangre parece negra. Pero hay mucho rojo en el flash de una cámara, de modo que la sangre parece roja cuando se ilumina de esta forma.

Piensa y clasifica

53. Verde 1 azul 5 cian 5 blanco 2 rojo. 55. El color reflejado es blanco menos 43. A 5 B 5 C (todas iguales) 45. B, C, A

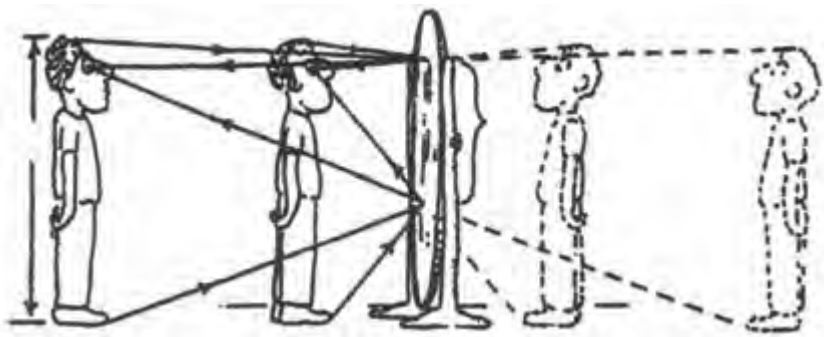
rojo, o cian. 57. Tales gafas eliminan la distracción que ofrecen las luces azul y Piensa y explica

violeta que se dispersan mucho más, aunque permiten al piloto ver en un rango de 47. El pie izquierdo de Peter está firmemente plantado sobre la mesa, detrás del frecuencias donde el ojo es sensible. (Las gafas que transmiten predominantemente espejo entre sus piernas. 49. Fred y McKenzie están entre dos espejos paralelos.

rojo también se desharían de las luces azul y violeta dispersadas, pero proporciona-La reflexión de un espejo incide sobre el otro, y así sucesivamente. Lo ideal serían luz a la cual el ojo no es muy sensible.) 59. De acuerdo. 61. La afirmación es ría que hubiera un número infinito de imágenes, pero la luz se pierde con cada cierta. Un tono más positivo omitiría la palabra sólo, porque el atardecer no son sólo reflexión. 51. El principio de Fermat para la refracción es de tiempo mínimo, los colores restantes; son aquellos colores que no se dispersaron en otras direccio-pero para reflexión también

podría ser de distancia mínima. Esto es así porque la nes. 63. A través de las emisiones volcánicas, la Luna parece cian, el color comple-luz no cambia de medios para reflexión, de modo que no ocurre cambio en rapi-mentario del rojo. 65. La espuma está compuesta de pequeños trozos de líquido dez y las trayectorias de tiempo mínimo y de distancia mínima son equivalentes.

que dispersan la luz como lo hace una nube. 67. Si la atmósfera fuese va rias veces Pero para la refracción, la luz pasa de un medio donde tiene cierta rapidez a otro más densa, la luz solar que llegaría a la Tierra sería predominantemente de frecuen-medio donde su rapidez es diferente. Cuando esto ocurre, las trayectorias rectas cias bajas porque la mayoría de la luz azul se dispersaría. La nieve probablemente de distancia mínima tardan más tiempo en viajar que las trayectorias de tiempo parecería anaranjada al mediodía, y de un rojo profundo cuando el Sol no estu-mínimo que no son en línea recta. Ve, por ejemplo, la diferencia en las trayecto-viera directamente arriba. 69. Los atardeceres ocurren de manera posterior a las rias de distancia mínima y de tiempo mínimo en la Figura 28.13. 53. Sí. La bala



RESPUESTAS A PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR

que rebota seguirá los mismos cambios en dirección cuando cambie su cantidad que no ayudaría a ver. Mientras que la reflexión difusa desde un camino rugoso de movimiento (ángulo de incidencia = ángulo de rebote), que los que sigue la luz permite a un conductor ver el camino iluminado por los faros en una noche seca, cuando se refleja de una superficie plana. 55. La luz que toma una trayectoria en una noche lluviosa el camino está cubierto con agua y actúa como un espejo del punto A al punto B seguirá la misma trayectoria inversa al ir del punto B al plano. Muy poca de la iluminación proveniente de los faros regresa al conductor y punto A, incluso si

está involucrada la reflexión o la refracción. De modo que si no en vez de ello se refleja hacia adelante (lo que produce un brillo para los conduc-puedes ver al conductor, el conductor no puede verte a ti. (Esta independencia de tores que se aproximan). 95. Ves la luz del cielo refractada hacia arriba cerca de la dirección a lo largo de la trayectoria de la luz es el "principio de recipro cidad".) la superficie del camino. 97. No. En ambos casos la luz se dobla alejándose de la 57. Dos superficies del espejo reflejan luz. La superficie frontal refleja cerca de 4%

normal al salir del agua. Es por ello que la esquina del cuadrado sumergido parece de la luz incidente, y la superficie plateada refleja la mayor parte del resto. Cuando ser menos profunda. Observa que es fácil confundir el haz de la imagen izquierda el espejo se inclina en la posición "diurna", con el espejo inclinado hacia arriba, la con el borde del cuadrado sumergido en la imagen de la derecha. La luz viaja desde luz que se refleja desde la superficie plateada se dirige arriba de la visión del con-el borde, no a lo largo del borde del cuadrado. 99. Lanza el arpón por abajo de ductor y el conductor ve la luz reflejada en la superficie frontal del espejo. Ese 4%

la posición aparente del pez, porque la refracción hace que el pez parezca más de luz trasera es suficiente para la conducción nocturna. 59. Las páginas rugosas cercano a la superficie de lo que en realidad está. Pero si apuntas a un pez con un proporcionan reflexión difusa, que puede verse desde cualquier ángulo. Si la página láser, no hagas ninguna corrección y sólo apúntalo directamente al pez. Eso es así fuese lisa, podría verse bien sólo a ciertos ángulos. 61. El espejo con media altura porque la luz proveniente del pez que tú ves se refractó al llegar a ti, y la luz láser se funciona a cualquier distancia, como se muestra en el dibujo. Esto es así porque, refractará a lo largo de la misma trayectoria para llegar al pez. Puede ser necesaria si te acercas más, tu imagen también se acerca más. Si te alejas, tu imagen hace lo una ligera corrección, según los colores del haz láser y del pez. 101. Un pez ve el mismo. Muchas personas en verdad tienen que probarlo antes de creerlo. ¡Ve la cielo (así como cierta reflexión del fondo) cuando mira hacia arriba a 45 porque diferencia entre esto y mirar un edificio alto en un espejo de bolsillo y mirarte tú el ángulo crítico es 48 para el agua. Si el pez mira a 48 o más sólo ve un reflejo mismo en el espejo de bolsillo!

del fondo. 103. Cuando envíes un haz láser hacia una estación espacial, no hagas ninguna corrección y sólo apunta a la estación que ves. Esto es como apuntar al pez mientras estás en la orilla,

como en la pregunta 99. La trayectoria de refracción es la misma en cualquier dirección. 105. Cuando el Sol está alto en el cielo y las personas en el avión miran abajo, hacia una nube opuesta a la dirección del Sol, pueden ver un arcoíris que forma un círculo completo. La sombra del avión aparecerá en el centro del arco circular. Esto es así porque el avión está directamente entre el Sol y las gotas o la nube de lluvia que producen el arco. 107. Una lupa usada como "vidrio para quemar" no hace más que reunir cierta cantidad de energía y concentrarla en cierto punto focal. La idea importante es que la lente es 63. El área limpiada será la mitad de alta que tu cara. 65. Los ojos de una mucho más grande que el área superficial de la alberca y no recolecta más energía persona hipermétrope parecen amplificados. 67. De acuerdo, como lo muestra solar de la que recibe la alberca de cualquier forma. La hoja puede ayudar a calen-una revisión de la Figura 28.24. Observa que los frentes de onda están más juntos tar la alberca al evitar la evaporación, como sería el caso con cualquier cubierta, en el agua que en el aire arriba de ella. 69. La luz roja viaja más rápido a través pero en ninguna forma las lentes dirigen energía solar adicional al agua de abajo.

del vidrio y sale primero. 71. La patas "no humedecibles" del insecto presionan Esta publicidad fraudulenta se aprovecha de la ignorancia del público. 109. El y curvan la superficie del agua, la cual efectivamente produce una lente que dirige doblamiento es menos pronunciado porque la luz ya frenó en el agua y frena sólo la luz lejos de su trayectoria para formar la región de sombra extendida. (Una un poco más en tu córnea. Es por esto por lo que los miopes ven más claro en el observación cercana muestra un anillo brillante alrededor de la región más oscu-agua que en el aire. El índice de refracción de tu córnea está más cerca del índice ra. Es interesante que la sombra y el anillo brillante tengan la misma brillantez del agua que el del aire. 111. Los dos rayos son una muestra de los muchísimos promedio: "conservación de luz".) 73. La visión normal depende de la cantidad rayos necesarios para producir una imagen clara. El par de rayos simplemente ubi-de refracción que ocurra para la luz que viaja del aire al ojo. El cambio de rapidez can la distancia de la imagen desde la lente.

garantiza una visión normal. Pero si el cambio de rapidez es del agua al ojo, en-Capítulo 29

tonces la luz se refractará menos y resultará una imagen menos clara. Un nadador Preguntas conceptuales

usa goggles para asegurarse de que la luz viaje del aire al ojo, incluso si está bajo 1. Todo punto en un frente de onda se comporta como una fuente de nuevas on-el agua. 75. El diamante centellea menos porque hay ángulos de refracción más das, que se combinan para formar nuevos frentes de ondas. 3. La difracción es pequeños entre el agua y el diamante. La luz ya frena cuando entra al diamante, más pronunciada a través de aberturas pequeñas. 5. Las ondas con longitud de de modo que la cantidad de más frenado, y refracción, se reduce. 77. La ima-onda más larga se difractan más que las ondas más cortas, de modo que las ondas gen será un poco más tenue con colores originales, pero de otro modo no será más largas de radio AM se difractan más. 7. Thomas Young demostró la natu -

afectada. 79. Si la luz tuviera la misma rapidez promedio en el vidrio que en el raleza ondulatoria de la luz. 9. Una superficie ópticamente plana es aquella aire, en las lentes no ocurriría refracción de la luz, y no ocurriría amplificación. La donde las franjas de interferencia tienen forma uniforme. 11. La iridiscencia se amplificación depende de la refracción, la cual a su vez depende de los cambios en produce por la interferencia de la luz. 13. Estos colores son colores de interfe-rapidez. 81. Una imagen estenopeica es clara. 83. La imagen producida por rencia, que resultan de la doble reflexión en dos superficies. 15. La polarización un pequeño orificio es clara pero muy tenue, una seria desventaja para una cámara distingue entre ondas longitudinales y transversales. 17. Cuando los ejes se ali-espía. Una cámara espía necesita toda la luz que pueda obtener porque la imagen nean, lo que pasa a través de uno pasa a través del otro. Cuando están en ángulo está muy alargada, de modo que la luz se dispersa. En consecuencia, es conve-recto, lo que pasa por el primero es absorbido por el segundo. 19. La luz refle-niente una gran abertura. 85. Para objetos muy distantes, efectivamente en el jada está polarizada en la dirección de la superficie plana de reflexión. 21. Sí.

"infinito", la luz llega a foco en el plano focal del lente. De modo que la superficie El fenómeno de paralaje subyace a la percepción profunda. 23. Los filtros de fotosensible está a una longitud focal en la parte trasera de la lente para tomas polarización en ángulo recto mutuo proyectan un par de imágenes que se funden muy distantes. Para distancias más cortas, está más alejada de la lente. 87. Sí.

sobre una pantalla. Estas imágenes pueden llegar a los ojos cuando las pantallas se

¡Las imágenes de hecho están de cabeza! El cerebro las vuelve a invertir. 89. Los ven a través de filtros de polarización con el mismo ángulo recto mutuo.

mapas de la Luna son vistas de cabeza de la Luna que coinciden con la imagen de cabeza que los observadores de la Luna ven en un telescopio astronómico.

Piensa y realiza

91. Las rapideces de la luz en la barra de vidrio y en el aceite son iguales. Dicho de 25. La difracción es bastante evidente. 27. Esta actividad revela la polarización otra manera: tanto el aceite como el vidrio tienen el mismo índice de refracción.

en el cielo.

Sólo verías la barra transparente sumergida si la luz experimentara un cambio de Piensa y explica

rapidez mientras pasara del aceite al vidrio y de vuelta al aceite. Ningún cambio en 29. La Tierra intercepta una fracción tan pequeña de la onda esférica en expan-la rapidez de la luz significa que no hay evidencia visual de su presencia.

sión proveniente del Sol que puede aproximarse como una onda plana (como una porción pequeña de la superficie esférica de la Tierra puede aproximarse como Piensa y discute

plana). Las ondas esféricas provenientes de una lámpara cercana tienen cur-93. Es más fácil de ver la superficie empedrada dispareja. La luz reflejada de vuelta vatura considerable. (Observa las Figuras 29.3 y 29.4.) 31. Las longitudes de desde tus faros es lo que te permite ver el camino. La superficie lisa como espejo onda de las ondas de radio AM tienen cientos de metros, mucho más grandes puede reflejar más luz, pero refleja la luz hacia adelante, no hacia atrás, de modo que el tamaño de los edificios, de modo que se difractan con facilidad alrededor

de los edificios. Las longitudes de onda FM tienen pocos metros, apenas para fotón de luz visible. El fotón ultravioleta con mayor energía puede causar cambios la difracción alrededor de edificios. La

luz, con longitudes de onda de una pe-químicos que producen una quemadura solar en la piel, cosa que un fotón visible queña fracción de centímetro, no muestra difracción apreciable alrededor de no puede hacer. 35. Un tubo de neón no se "agota" de átomos que excitar porque edificios. 33. Deben diferir por media longitud de onda, o un número impar sus átomos se excitan una y otra vez, sin la necesidad de átomos "nuevos". 37. Las de media longitud de onda. 35. La luz azul producirá franjas con más espa-

"líneas" espectrales serían puntos redondos. Líneas muy cercanas serían más fáciles ciamiento. 37. Resultará una interferencia destructiva. 39. Las franjas se acer-de discernir que los puntos que se pudieran traslapar. Además, si el diámetro del can más conforme las rendijas se separan más. (Observa esto en las fotografías agujero se hiciera tan pequeño como el ancho de la rendija, pasaría insuficiente luz.

de la Figura 29.14). 41. Refracción: arcoíris. Reflexión selectiva: pétalos de Por ende, las imágenes de una rendija son superiores. 39. Cuando un espectro flor. Interferencia en una película delgada: pompas de jabón. 43. Los colores del Sol se compara con el espectro del elemento hierro, las líneas de hierro se tras-de interferencia resultan de las reflexiones dobles en las superficies superior e in-lapan y coinciden perfectamente con ciertas líneas de Fraunhofer. Esto es evidencia ferior del delgado recubrimiento transparente sobre las alas de la mariposa. Al-de la presencia de hierro en el Sol. 41. Los patrones de líneas espectrales que gunas otras alas de mariposa producen colores por difracción, donde crestas en aparecen en la luz de las estrellas también aparecen en los espectros de elementos la superficie actúan como rejillas de difracción. 45. Ocurre interferencia de luz de la Tierra. Debido a que los espectros de luz provenientes de estrellas distantes desde las superficies superior e inferior de la película jabonosa o de detergente.

coinciden con los espectros de elementos en la Tierra, se concluye que el planeta 47. La luz proveniente de un par de estrellas no producirá un patrón de interferen-y el Universo observable tienen las mismas "huellas" y están hechos de la misma cia porque las ondas de luz de las dos fuentes separadas son incoherentes; cuando materia. 43. Las estrellas son fuentes incandescentes, donde la frecuencia de ra-se combinan, se emborronan. La interferencia ocurre cuando la luz proveniente diación pico es proporcional a la temperatura estelar. Pero la luz proveniente de los de una sola fuente se divide y recombina. 49. Azul, el color complementario, se tubos de descarga de gas no es función de las temperaturas del gas; depende

de transmite. El azul es blanco menos la luz amarilla que se ve arriba. (Observa que los estados de excitación en el gas. Estos estados no dependen de la temperatura del este ejercicio se remite a información en el Capítulo 27.) 51. La polarización es gas y pueden ocurrir ya sea que el gas esté caliente o frío. 45. La excitación ató- una propiedad de las ondas transversales. A diferencia de la luz, el sonido es una mica ocurre en sólidos, líquidos y gases. Puesto que los átomos en un sólido están onda longitudinal y no puede polarizarse. De hecho, ya sea que una onda pueda o estrechamente empacados, la radiación que proviene de ellos (y de los líquidos) se no polarizarse, es una de las pruebas para distinguir las ondas transversales de las corre en una amplia distribución para producir un espectro continuo, mientras que ondas longitudinales. 53. Si el filtro se alinea con la polarización de la luz, toda la la radiación proveniente de átomos muy espaciados en un gas está en montones luz pasa a través de él. Si se alinea perpendicular a la polarización de la luz, ninguna separa dos que producen "líneas" discretas cuando se difracta mediante una reji-pasa. A cualquier otro ángulo, parte de la luz pasa porque la luz polarizada puede lla. 47. Cuando los átomos de tungsteno están estrechamente empacados en un

"descomponerse" (como un vector) en componentes paralelo y perpendicular a la sólido, los niveles de energía de las capas electrónicas exteriores, que por lo demas alineación del filtro. 55. Puedes determinar el eje de polarización al ver el deste-están bien definidos, se extienden por interacciones mutuas entre los átomos veci-llo desde una superficie plana, como en la Figura 29.34. El destello es más intenso nos. El resultado es una banda de energía compuesta de miríadas de niveles distintos cuando el eje de polarización es paralelo a la superficie plana. 57. El eje del filtro muy juntos. Puesto que existen aproximadamente tantos de estos niveles distintos debe ser vertical y no permitir el paso del destello, que es paralelo al plano del sue-como hay átomos en la estructura cristalina, la banda no puede distinguirse a partir lo: horizontal. 59. Puedes determinar que el cielo está parcialmente polarizado de una dispersión continua de energías. 49. La luz que se absorbe es parte de un si giras una sola hoja de Polaroid enfrente de tu ojo mientras ves el cielo. Obser-haz. La luz que de hecho se reemite marcha en todas direcciones, con muy poco a varás que el cielo se oscurece cuando el eje del Polaroid es perpendicular al eje de lo largo de la dirección del haz que ilumina. En consecuencia, dichas regiones del polarización de la luz del cielo. 61. La interferencia es central para la holografía.

espectro son oscuras. 51. (a) Se observa un "espectro de absorción",

con ciertas Piensa y discute

líneas oscuras en un fondo de luz continua. (b) El "espectro de emisión" contiene 63. La luz roja con longitud de onda más larga producirá franjas más espa-algunas líneas brillantes, cuya mayoría coincide con las líneas del espectro de absor-ciadas. 65. La mancha será brillante debido a la interferencia constructiva.

ción. 53. La fluorescencia requiere que los fotones de luz que inician el proceso 67. El problema es serio: dependiendo de la orientación del eje de polarización de tengan más energía que los fotones de luz emitida. Si se emitiera luz visible, enton-la pantalla y las gafas, no podría verse la pantalla.

ces los fotones infrarrojos de menor energía no podrían iniciar el proceso. 55. Los diferentes colores emitidos por los minerales fluorescentes corresponden a diferen-Capítulo 30

tes moléculas con diferentes conjuntos de estados energéticos. En consecuencia, Preguntas conceptuales

dichos minerales pueden distinguirse visualmente. 57. La iluminación mediante 1. A estas frecuencias altas, se emite luz ultravioleta. 3. Los electrones en las capas luz de menor frecuencia no tiene fotones suficientemente energéticos como para electrónicas exteriores tienen más energía potencial. 5. Son iguales. 7. La luz excitar los átomos. Por el contrario, la iluminación con luz ultravioleta sí tiene azul tiene tanto una frecuencia más alta como mayor energía por fotón. 9. Los suficiente energía para expulsar los electrones, lo que deja ionizados a los átomos colores indican los varios átomos que experimentan excitación. 11. Un espec-en el material. Impartir diferentes energías produce diferentes resultados. 59. Los troscopio es un aparato que mide las frecuencias de la luz en un haz de luz. 13. La LED tienen vidas más largas que las CFL y las lámparas incandescentes, lo que relación es $f = T$ (también estudiada en el Capítulo 16). 15. Las líneas de Fraun-reduce los costos de mantenimiento. 61. Los LED probablemente predomina-hofer son líneas de absorción espectral en el espectro solar. 17. Hay más energía rán debido a que tienen vidas más largas y no tienen mercurio. 63. Los fotones por fotón en la luz ultravioleta. 19. Un estado metaestable es un estado pro-provenientes de la lámpara de destello deben tener al menos tanta energía como los longado de excitación. 21. La excitación primaria es mediante un impacto de fotones que pretenden producir en el láser. Los fotones rojos tienen menos energía electrones; la secundaria es mediante un impacto de

fotones. 23. Un LED dura que los fotones verdes, de modo que no serían suficientemente energéticos como incluso más tiempo que una bombilla incandescente. 25. La luz coherente es de para estimular la emisión de fotones verdes. Los fotones verdes energéticos pueden fotones que tienen una sola frecuencia que está en fase mutua. La luz solar, por el producir fotones rojos menos energéticos, pero no al revés. 65. Si el estado me-contrario, es luz incoherente.

taestable no tuviese una vida relativamente larga, no habría suficiente acumulación Piensa y realiza

de átomos en este estado excitado para producir la "inversión de población" que 27. ¡La abuela ha visto este avance de las lámparas!

es necesaria para la acción láser. 67. La afirmación de tu amigo viola la ley de conservación de la energía. Un láser, o cualquier dispositivo, no puede producir Piensa y resuelve

más energía de la que se le pone. La potencia, por otra parte, es otra historia. 69.

29. (a) La transición de B a A, tiene el doble de energía y el doble de frecuencia f = T

es la frecuencia pico de la radiación incandescente; esto es, la frecuencia a la que la transición C a B. En consecuencia, tiene la mitad de la longitud de onda, cual la radiación es más intensa. T es la temperatura Kelvin del emisor. 71. Sí.

o 300 nm. Dado que c = f , = c/ f. La longitud de onda es inversamente pro-Ambos radian energía, pero debido a que las temperaturas son diferentes, el Sol porcional a la frecuencia, de modo que el doble de frecuencia significa la mitad más caliente emite frecuencias de luz más altas que la Tierra, y con mucha mayor de la longitud de onda. (b) La transición de C a A tiene tres veces la energía y tres intensidad. 73. Todos los cuerpos no sólo radian energía, sino que también la ab-veces la frecuencia de la transición de C a B. Por tanto, tiene un tercio la longitud sorben. Si radiación y absorción ocurren a tasas iguales, no hay cambio en la tem -

de onda, o 200 nm.

peratura. 75. La temperatura es más baja para las estrellas rojizas, media para las Piensa y explica

estrellas blanquecinas y más caliente para las azuladas. 77. El espectro solar es 31. Los niveles de energía son diferentes de los átomos y las moléculas de diferentes un espectro de absorción, con líneas oscuras llamadas líneas de Fraunhofer en ho-materiales, de ahí las diferentes frecuencias de radiación emitida cuando ocurre nor de Joseph von Fraunhofer, quien las descubrió. 79. La energía se conserva, y excitación. Diferentes colores corresponden a diferentes cambios de energía y fre-la frecuencia es proporcional a la energía

de un fotón. De modo que la suma de las cuencias. 33. Más energía se asocia con cada fotón de luz ultravioleta que con un dos frecuencias es igual a la frecuencia de la luz emitida en la transición del nivel

RESPUESTAS A PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR

S-29

cuántico 4 al estado base, nivel cuántico 1. 81. Sólo resultarían tres: una del 4 al un fotodetector. Cuando caminas y atraviesas el haz de luz, bloqueas el haz y cesa la base, una del 3 al base, y una del 2 al base. La transición del 4 al 3 involucraría la generación de corriente en el fotodetector. Este cambio de corriente activa entonces misma diferencia en energía y sería indistinguible de la transición de 3 a 2, o de 2 al la apertura de la puerta. 41. El efecto fotoeléctrico es descargar la bola. Algunos de base. Del mismo modo, la transición de 4 a 2 tendría el mismo cambio en energía los electrones en exceso se "sacan" de la bola por la luz ultravioleta. Esto descarga la que la transición de 3 al base.

bola. Sin embargo, si la bola tiene carga positiva, ya tiene una deficiencia de electro-Piensa y discute

nes, y sacar más tiende a aumentar la carga en lugar de reducirla. (Menos electrones 83. El calentamiento continuo de un pedazo de metal al rojo vivo aumentará la se desalojan con luz ultravioleta de la bola positiva que de la bola negativa. ¿Puedes frecuencia pico en medio del espectro visible, y brillará al rojo blanco (porque todas ver por qué?) 43. La luz que se refracta a través del sistema de lentes se comprende las frecuencias visibles están presentes). Ve la curva de radiación en la Figura 30.7.

desde el modelo ondulatorio de la luz, y su llegada punto por punto para formar la El calentamiento continuo aumentará la frecuencia pico en la parte ultravioleta del imagen se comprende desde el modelo corpuscular de la luz. ¿Cómo puede ser esto?

espectro, y parte de él permanece en el azul y el violeta. De modo que sí: puedes Se ha tenido que concluir que incluso cada fotón tiene propiedades ondulatorias.

calentar un metal hasta que se ponga "rojo azul". (La razón por la que no puedes ver Éstas son ondas de probabilidad que determinan dónde es o no probable que vaya el metal al "rojo azul" es porque el metal se vaporizará antes de que pueda tener brillo un fotón. Estas

ondas interfieren de maneras constructiva y destructiva en diferen-azul. Sin embargo, muchas estrellas tienen brillo azul.) 85. Una estrella con su fre-tes posiciones de la película, de modo que los puntos de impacto de fotones están cuencia pico en el ultravioleta emite suficiente luz en la parte de frecuencia más alta en concordancia con la probabilidad determinada por las ondas. 45. Un fotón se del espectro visible para parecer "rojo violeta". Si fuese más fría, todas las frecuencias comporta como una onda cuando está en tránsito y como una partícula cuando estarían más equilibradas en intensidad, lo cual las haría ver más blancas.

se emite o absorbe. 47. El microscopio electrónico aprovecha la naturaleza ondulatoria de los electrones. 49. El fotón pierde energía, de modo que su frecuencia Capítulo 31

disminuye. (En realidad se dice que un fotón se absorbe y otro fotón se emite, uno Preguntas conceptuales

con menor energía.) 51. Obviamente la bala de cañón tiene mayor cantidad de 1. Los tres apoyaron la teoría ondulatoria. 3. Planck consideró que la ener-movimiento que el proyectil de la carabina de aire que viaja con la misma rapidez, gía de los átomos en vibración, no la luz, estaba cuantizada. 5. Sí. En general, de modo que, en concordancia con la fórmula de De Broglie, el proyectil de la f representa la frecuencia. 7. Los fotones de luz violeta tienen más energía y, carabina de aire tiene la longitud de onda más larga. (Ambas longitudes de onda son por tanto, tienen más éxito para desalojar electrones. 9. Las fotografías están muy pequeñas como para medirse.) 53. Los protones con la misma rapidez que compuestas de pequeñas unidades. 11. La luz viaja en una forma ondulatoria los electrones tendrían más cantidad de movimiento, y por tanto longitudes de onda de una ubicación a otra. 13. La luz se comporta como una onda en tránsito, más cortas, y en consecuencia menos difracción. La difracción es una ventaja para como una partícula cuando se absorbe. 15. Al viajar a través de rendijas, la luz las ondas de radio con longitud de onda larga, que les ayuda a librar obstrucciones, actúa en forma ondulatoria; golpea la pantalla como partícula. El patrón de gol-pero es un inconveniente en los microscopios, donde vuelven las imágenes difusas.

pes es ondulatorio. 17. El producto p x es mayor que o igual a h-barra. 19.

¿Por qué no hay microscopios protónicos? Los hay; se les llama aceleradores atómi-Como con la cantidad de movimiento, sólo una u

otra pueden ser precisas.

cos. La alta cantidad de movimiento de los protones con alta velocidad permite la 21. Los aspectos de onda y partícula, tanto de la materia como de la radiación, extracción de información detallada de la estructura nuclear, e ilumina un dominio son partes necesarias y complementarias del todo.

mucho más pequeño que el tamaño de un solo átomo. 55. Si alguien observa un Piensa y resuelve

electrón en la punta de tu nariz con un haz de electrones o un haz de luz, entonces su 23. Frecuencia es rapidez/longitud de onda: f (3 108 m/s)/(2.5 102 m) movimiento, así como el de los electrones circundantes, se alterará. Aquí se adopta 1.2 1010 Hz. La energía del fotón es constante de Planck frecuencia: E hf la opinion de que observar pasivamente la luz después de que se refleja de un objeto (6.63 1034 Js(1.2 1010 Hz) = 8.0 1024 J. 25. La cantidad de movi-no altera los electrones en el objeto. Se distingue entre observación pasiva y sondeo.

miento de la bola es mv (0.1 kg)(0.001 m/s) = 1.0 10-4 kgm/s, de modo que El principio de incertidumbre se aplica al sondeo, no a la observación pasiva. (Sin su longitud de onda de De Broglie es h/ p (6.6 1034 Js)/(1.0 104 kgm/s) embargo, esta opinión no la sostienen algunos físicos que afirman que cualquier 6.6 1030 m. Este valor es increíblemente pequeño con relación incluso a medición, pasiva o de sondeo, altera lo que se mide al nivel cuántico. Estos físicos la pequeña longitud de onda del electrón. No hay posibilidades de poner a rodar argumentan que la observación pasiva proporciona conocimiento, y que sin este una bola tan lento que su longitud de onda pueda verse.

conocimiento, el electrón puede hacer algo más o puede hacer una mezcla, una Piensa y explica

superposición, de otras cosas.) 57. El principio de incertidumbre de Heisenberg 27. La física clásica es principalmente la física conocida antes de 1900 que incluye se aplica sólo a fenómenos cuánticos. Sin embargo, sirve como metáfora popular el estudio del movimiento en concordancia con las leyes de Newton y el estudio para el dominio macro. Así como la forma en que se mide afecta lo que se mide, la del electromagnetismo en concordancia con las leyes de Maxwell. La mecánica forma en que se frasea una pregunta a menudo influye la respuesta que se obtiene.

clásica, con frecuencia llamada mecánica newtoniana, se caracteriza por la preDe modo que, en varios sentidos, se altera lo que se quiere medir en una encuesta dictibilidad absoluta. Después de 1900, los científicos descubrieron que las re-de opinión pública. Si bien existen incontables ejemplos de alteración de las cir-glas newtonianas simplemente no se aplican en el dominio de lo muy pequeño: cunstancias cuando se miden, el principio de incertidumbre sólo tiene significado lo submicroscópico. Éste es el dominio de la física cuántica, donde las cosas son en el mundo submicroscópico. 59. El principio de incertidumbre se refiere sólo

"granulosas" y donde los valores de energía y cantidad de movimiento (así como de al reino cuántico, no al mundo macro. El aire que escapa de un neumático es un masa y carga) ocurren en trozos, o cuantos. En este dominio, partículas y ondas se evento del mundo macro. 61. A menos que el término se refiera a fuga hacia funden y las reglas básicas son reglas de probabilidad, no certezas. La física cuántica un reino completamente diferente, no, porque un salto cuántico es la transición más es diferente y no fácil de visualizar como la física clásica. No obstante, uno tiende a pequeña que algo puede experimentar.

imprimir los modelos clásicos de onda y partícula en los hallazgos con la intención de visualizar este mundo subatómico. 29. En concordancia con $E = hf$, la ener -

Piensa y discute

gía de un fotón con el doble de frecuencia tiene el doble de energía. Los foto-63. Encontrar materiales que respondieran fotoeléctricamente a la luz roja era difícil nes violeta son aproximadamente el doble de energéticos que los fotones rojos.

porque los fotones de luz roja tienen menos energía para la producción de imágenes 31. No tiene sentido hablar de fotones de luz blanca porque la luz blanca es una que los fotones de luces verde o azul. 65. La energía de la luz roja es muy baja mezcla de varias frecuencias y, por tanto, una mezcla de muchos fotones. Un fotón por fotón para disparar la reacción química en los cristales fotográficos. Luz muy de luz blanca no tiene significado físico. 33. Dado que la luz roja porta menos brillante simplemente significa que hay más fotones que no pueden disparar una energía por fotón, y ambos haces tienen la misma energía total, debe haber más reacción. La luz azul, por otra parte, tiene suficiente energía por fotón para disparar fotones en el haz de luz roja. 35. No es la energía total en el

haz de luz la que causa una reacción. La luz azul muy tenue dispara menos reacciones sólo porque están la expulsión de los electrones, sino la energía por fotón. En consecuencia, algunos involucrados menos fotones. Es más seguro tener luz roja brillante que luz azul fotones azules pueden desalojar algunos electrones, mientras que hordas de fotones tenue. 67. Habrá colores hacia el extremo rojo del espectro, donde el medidor rojos de baja energía no pueden desalojar ninguno. Los fotones actúan de manera no mostrará lectura, pues no se expulsan electrones. A medida que el color cam-individual, no en concierto. 37. Los protones se mantienen en el interior de los bia hacia el azul y el violeta, llegará un punto en el cual el medidor comenzará núcleos en la profundidad de los átomos. Para expulsar un protón de un átomo se a ofrecer una lectura. Si un color para el cual el medidor lee cero se vuelve más necesita aproximadamente un millón de veces más energía que para expulsar un intenso, el medidor continuará marcando cero. Si un color para el cual el medidor electrón. De modo que uno necesitaría un fotón de rayo gamma de alta energía en muestra una lectura se vuelve más intenso, la corriente registrada por el medidor au -

lugar de un fotón de luz visible para producir un efecto "fotoprotónico". 39. Algu-mentará conforme más electrones se expulsen. 69. El protón más masivo tie-nas puertas automáticas utilizan un haz de luz que brilla de manera continua sobre ne mayor cantidad de movimiento, mientras que el electrón con su cantidad de

movimiento más pequeña tiene la longitud de onda más larga. 71. Conforme Piensa y discute

aumenta la velocidad, aumenta la cantidad de movimiento, de modo que, por la 49. Los electrones pueden ser impulsados hacia muchos niveles de energía y, en con-fórmula de De Broglie, la longitud de onda del protón se vuelve más corta. 73.

secuencia, pueden realizar muchas combinaciones de transiciones hacia el nivel base La constante de Planck sería muchísimo mayor que su valor actual. 75. No se y los niveles intermedios. La gran variedad de transiciones produce el gran número sabe si un electrón es una partícula o una onda; se sabe que se comporta como una de líneas espectrales en un espectroscopio. Incluso el hidrógeno, con un solo electrón, onda cuando se mueve de un lugar a otro y se

comporta como partícula cuando tiene muchas líneas, la mayoría de las cuales están en el ultravioleta y el infrarro-incide sobre un detector. La suposición innecesaria es que un electrón debe ser una jo. 51. Los electrones tienen una masa definida y una carga definida, y en ocasiones partícula o una onda. Es común escuchar a algunas personas decir que algo debe ser pueden detectarse en puntos específicos, por lo que se dice que tienen propieda -

o esto o aquello, como si no pudiera ser ambos (como quienes dicen que uno debe des de partícula; los electrones también producen efectos de difracción e interferen-elegir entre evolución biológica o la existencia de un ser supremo).

cia, por lo que se dice que tienen propiedades ondulatorias. Sólo existe contradicción Capítulo 32

si uno insiste en que el electrón puede tener sólo propiedades de partícula o sólo de Preguntas conceptuales

onda. Los investigadores descubrieron que los electrones muestran propiedades tanto 1. La mayoría de las partículas permanecía sin desviación debido al espacio va-de partícula como de onda. 53. Einstein pensaba que la mecánica cuántica no era cío en el interior de los átomos. 3. Franklin postuló que la electricidad es un fundamental, pero que todavía había fundamentos que descubrir.

fluido eléctrico que fluye de un lugar a otro. 5. La desviación del rayo indica Capítulo 33

la presencia de una carga eléctrica. 7. Millikan descubrió la masa y la carga del Preguntas conceptuales

electrón. 9. Rydberg y Ritz descubrieron que la frecuencia de una línea espectral 1. Roentgen descubrió la emisión de un "nuevo tipo de rayos". 3. Becquerel desen el espectro de un elemento es igual a la suma o diferencia de otras dos líneas cubrió que el uranio emite un nuevo tipo de radiación penetrante. 5. Los rayos espectrales. 11. Sí, si existe al menos un estado energético intermedio hacia el gamma no tienen carga eléctrica. 7. Un rad es una unidad de energía absorbida.

cual pueda transitar el electrón en su camino. 13. Las circunferencias de las Un rem es una medida de radiación con base en el daño potencial (roentgen equi-órbitas son discretas porque se componen de longitudes enteras particulares del valente en humano). 9. Sí. El potasio radiactivo está en todos los seres huma-electrón. 15.

Los electrones no caen en espiral hacia el núcleo porque están nos. 11. Protones y neutrones son dos nucleones diferentes. 13. Dado que la compuestos de ondas que se refuerzan a ellas mismas. 17. La función de den-fuerza fuerte es de corto alcance, los protones en un núcleo grande están más sepa-sidad de probabilidad es el cuadrado de la función de onda. 19. Lo que corres-rados en promedio que en un núcleo pequeño, y la fuerza fuerte es menos efectiva ponde es el traslape entre las teorías nueva y anterior, si la teoría nueva es válida.

entre los protones muy separados. 15. Los núcleos grandes contienen un mayor Piensa y explica

porcentaje de neutrones. 17. La vida media de Ra-226 es 1,620 años. 19. Un 21. Los fotones provenientes de la lámpara ultravioleta tienen mayores frecuencias, contador Geiger percibe radiación por ionización. 21. La transmutación es el energía y cantidad de movimiento. Sólo la longitud de onda es mayor para los cambio de un elemento a otro elemento. 23. Cuando el torio emite una partí-fotones emitidos desde el transmisor de televisión. 23. Una pequeña fracción de cula beta, transmuta a un elemento con un número atómico que aumenta en 1, las partículas alfa se desvía (dispersa) a través de un ángulo grande, lo que indica un a un número atómico de 91. 25. Cuando un núcleo emite una partícula alfa, el campo eléctrico tan intenso dentro del átomo que la carga positiva debe concen-número atómico disminuye en 2. Para la emisión de una partícula beta, el número trarse en un pequeño núcleo central, un núcleo que es masivo, así como pequeño, atómico aumenta en 1. Para la emisión gamma, no hay cambio en número atómi-porque las partículas alfa rebotadas no mostraron una pérdida importante de ener-co. 27. Ernest Rutherford, en 1919, fue el primero en transmutar elementos de gía cinética. 25. Los experimentos de Rutherford demostraron que la carga posi-manera intencional. 29. La mayor parte del carbono que ingieres es carbono-12.

tiva debe concentrarse en un pequeño núcleo, el núcleo atómico. 27. La misma Piensa y realiza

cantidad de energía se necesita para regresar el electrón que se dio al fotón cuando 31. El punto es que la radiactividad no es algo nuevo, sino que es parte de la cayó al estado base. 29. La órbita más pequeña es aquella que tiene una circunfe-naturaleza.

rencia igual a una longitud de onda, de acuerdo con el modelo de De Broglie. 31.

Piensa y resuelve

Si consideras que los electrones orbitan el núcleo en ondas estacionarias, entonces 33. La vida media del material es de 2 horas. Un poco de razonamiento mostra-la circunferencia de estos patrones ondulatorios debe ser un número entero de rá que 160 dividido a la mitad cuatro veces es igual a 10. De modo que hubo longitudes de onda. De esta forma las circunferencias y también los radios de las ór-cuatro periodos de vida media en las 8 horas, y 8 horas/4 2 horas. 35. A bitas son discretos. (En un modelo ondulatorio más depurado, existen ondas esta -

las 3:00 p.m. han transcurrido nueve horas. Esto es 9/1.8 5 vidas medias. De cionarias en las direcciones radial y orbital.) 33. La frecuencia de todo fotón se modo que (1/2) (1/2) (1/2) (1/2) (1/2) 1/32 la cantidad original, o relaciona con su energía mediante E = hf, de modo que si dos frecuencias suman lo 0.0313 miligramos. A medianoche, 18 horas después, 18/1.8 10 vidas medias mismo que una tercera frecuencia, dos energías suman lo mismo que una tercera transcurridas. (1/2)10 es aproximadamente 1/1,000 del original, o más o menos energía. En la transición de salto de rana, como la que ocurre desde el tercero al 0.001 miligramos. Si el hospital necesita F-18 al día siguiente, debe producirlo primer nivel de energía en la Figura 32.10, la conservación de la energía exige que a la mañana siguiente. 37. En el tanque hay 500 galones porque, después de la energía emitida sea la misma que la suma de las energías emitidas para la cascada mezclar, el galón que extrajiste tiene 10/5,000 1/500 de las partículas radiac-de las dos transiciones. Por tanto, la frecuencia para la transición de salto de rana es tivas originales en ella.

la suma de las frecuencias para las dos transiciones en la cascada. 35. La interferencia constructiva para formar una onda estacionaria requiere un número entero Piensa y clasifica

de longitudes de onda alrededor de una circunferencia. Cualquier número de lon-39. (a) B C, A; (b) C, A B; (c) B C, A

gitudes de onda de De Broglie no igual a un número entero conduciría a una in-Piensa y explica

terferencia destructiva, lo que evitaría la formación de una onda estacionaria. 37.

41. Kelvin no sabía del decaimiento radiactivo, una fuente de

energía para man-La respuesta a ambas preguntas es sí. Debido a que una partícula tiene propiedades tener a la Tierra caliente durante miles de millones de años. 43. La radiación ondulatorias y una longitud de onda relacionada con su cantidad de movimien-gamma está en la forma de ondas electromagnéticas, mientras que la radiación alfa to, puede mostrar las mismas propiedades que otras ondas, incluidas difracción y beta consiste en partículas que tienen masa. 45. Es imposible que un núcleo e interferencia. 39. Sí. Puedes ver esto a partir de la ecuación de De Broglie de hidrógeno expulse una partícula alfa porque una partícula alfa está compuesta de (longitud de onda = h/cantidad de movimiento), donde, si h fuese más grande cuatro nucleones: dos protones y dos neutrones. Es igualmente imposible que un para una cantidad de movimiento dada, las longitudes de onda de las ondas esta-melón de 1 kg se desintegre en cuatro melones de 1 kg. 47. La partícula alfa tiene cionarias que constituyen las capas electrónicas sería más grande, y en consecuen-el doble de carga, pero casi 8,000 veces la inercia (dado que cada uno de los cuatro cia, los átomos serían más grandes. 41. Ambos son consistentes. El principio de nucleones tiene casi 2,000 veces la masa de un electrón). De modo que la masa correspondencia exige concordancia de los resultados cuántico y clásico cuando la mucho mayor de las partículas alfa compensa por demás su carga doble y rapidez

"granulosidad" del mundo cuántico no es importante, pero permite desacuerdo más baja. 49. La radiación alfa reduce el número atómico del elemento emisor cuando la granulosidad es dominante. 43. El principio de correspondencia de en 2 y el número de masa atómica en 4. La radiación beta aumenta el número Bohr dice que la mecánica cuántica se debe traslapar y concordar con la mecánica atómico de un elemento en 1 y no afecta el número de masa atómica. La radiación clásica en el dominio donde la mecánica clásica ha mostrado ser válida. 45. Es gamma no afecta el número atómico o el número de masa atómica. De modo que la naturaleza ondulatoria de la materia la que mantiene a los átomos separados la radiación alfa resulta en el cambio más grande tanto en número atómico como y le brinda volumen a la materia en el mundo a tu alrededor. De otro modo, todo en número de masa. 51. La radiación gamma predomina dentro del elevador ce-colapsaría y no habría materia como se le conoce. 47. Respuesta abierta.

rrado porque la estructura del elevador blinda contra partículas alfa y beta mejor

RESPUESTAS A PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR

que contra fotones de rayos gamma. 53. Una partícula alfa experimenta una principales. 9. El isótopo es U-239. 11. El isótopo es Pu-239. 13. Se produ-aceleración debida a la repulsión eléctrica mutua en cuanto está fuera del núcleo ce plutonio. 15. U-238 se reproduce para convertirse en Pu-239. 17. Ventajas: y lejos de la fuerza nuclear de atracción. Esto se debe a que tiene el mismo signo electricidad abundante, combustibles fósiles ahorrados para materiales y ninguna de carga que el núcleo. Cargas iguales se repelen. 55. Puesto que tiene el do -

contaminación atmosférica. Desventajas: almacenamiento de desechos, peligro de ble de carga que una partícula beta, una partícula alfa interactúa más fuertemente proliferación de armas, liberación de radiactividad y riesgo de accidentes. 19.

con los electrones atómicos y pierde energía más rápido al ionizar a los átomos.

Sí y sí. La forma de energía es masa aumentada. 21. La Figura 34.35 muestra (La menor rapidez de la partícula alfa también contribuye a su capacidad para la masa frente al número atómico, mientras que la Figura 34.16 muestra la masa ionizar átomos de manera más efectiva.) 57. Dentro del núcleo atómico, la fuerza por nucleón frente al número atómico. 23. La masa por nucleón disminuye en nuclear fuerte es la que mantiene unidos los nucleones, y la fuerza eléctrica es la los fragmentos de fisión. 25. Avanzar hacia el hierro significa menos masa por que repele mutuamente a los protones y los separa. 59. Sí, ¡de hecho! 61. Las nucleón. 27. El helio debe fusionarse para liberar energía. 29. El deuterio es propiedades químicas tienen que ver con la estructura electrónica, que está deter- abundante, se encuentra en el agua ordinaria. El tritio es escaso y debe crearse.

minada por el número de protones en el núcleo, no por el número de neutrones.

Piensa y realiza

63. La trayectoria en espiral de las partículas cargadas en una cámara de burbujas 31. Respuesta abierta.

es resultado de enlentecimiento de las partículas debido a las colisiones con los átomos, en general hidrógeno, en la cámara. Las partículas cargadas con movimiento Piensa y resuelve

más lento se doblan más en el campo magnético de la cámara y sus trayectorias se 33. Cuando el Li-6 absorbe un neutrón, se convierte en Li-7, hecho de tres pro-vuelven espirales. Si las partículas cargadas se movieran sin resistencia, sus trayec-tones y cuatro neutrones. Si este núcleo de Li-7 se divide en dos partes, una de las torias serían círculos o hélices. 65. La masa del elemento es 157 100 257.

cuales es un núcleo de tritio que contiene un protón y dos neutrones, entonces Su número atómico es 100, de modo que es el elemento transuránico llamado la otra parte debe estar hecha de dos protones y dos neutrones. Esto es una par-fermio, en honor de Enrico Fermi. 67. Después de que el núcleo de polonio tícula alfa, el núcleo del helio ordinario. Es el tritio, no el helio, el que alimenta emite una partícula beta, el número atómico aumenta por 1 para convertirse en la reacción explosiva.

85, y el número de masa atómica no cambia de 218. 69. Ambos tienen 92 pro-Piensa y clasifica

tones, pero el U-238 tiene más neutrones que el U-235. 71. Un elemento puede 35. A, B, C, D

decaer a un elemento con un número atómico más alto al emitir electrones (rayos beta). Cuando esto ocurre, un neutrón en el núcleo se convierte en protón y el Piensa y explica

número atómico aumenta en 1. 73. No. Cuando un núcleo de fósforo (número 37. Las plantas eléctricas nucleares usan fisión. 39. La repulsión eléctrica entre atómico 15) emite un positrón (un electrón con carga positiva), la carga del nú -

protones se extiende a todo el núcleo y afecta a todos los protones, mientras que cleo ató mico disminuye en 1, lo que lo convierte en el núcleo del elemento silicio la fuerza nuclear de atracción se extiende sólo de un nucleón a los vecinos más cer-

(número atómico 14). 75. Si los núcleos estuvieran compuestos de igual núme-canos. De modo que cuanto más grande sea el número de protones en un núcleo, ro de protones y electrones, los núcleos no tendrían carga neta. No conservarían mayor es la probabilidad de que la repulsión mutua supere las fuerzas nucleares de electrones en órbita. El hecho de que los átomos tengan un núcleo positivo y elec -

atracción y conduzcan a la fisión. 41. En un gran pedazo de material fisionable, trones en órbita contradice la afirmación de tu

amigo. 77. De acuerdo con tu un neutrón puede moverse más lejos por el material antes de llegar a una superfi-amigo, quien ve que el gas helio son partículas alfa. Es cierto: las partículas alfa cie. Los volúmenes más grandes de material fisionable tienen un área proporcio-emitidas por isótopos radiactivos en la base frenan y se detienen, capturan dos nalmente más pequeña comparada con sus volúmenes más grandes, y por tanto electrones y se convierten en átomos de helio. Los suministros de helio provie-pierden menos neutrones. 43. La masa crítica es la cantidad de masa fisionable nen del subsuelo. Cualquier helio en la atmósfera pronto se disipa hacia el espa-que apenas sostiene una reacción en cadena sin explotar. Esto ocurre cuando la cio. 79. La energía natural de la Tierra, que calienta el agua en los manantiales producción de neutrones en el material se equilibra con los neutrones que es-termales, es la energía del decaimiento radiactivo. Así como un pedazo de material capan por la superficie. Cuanto mayor sea el escape de neutrones, mayor es la radiactivo es más caliente que sus alrededores debido a la agitación térmica del masa crítica. Se sabe que una forma esférica tiene la menor área superficial para decaimiento radiactivo, el interior de la Tierra igualmente es más caliente. En cualquier volumen dado, de modo que, para un volumen dado, un cubo tiene un consecuencia, la gran radiactividad en el interior de la Tierra calienta el agua, pero área más grande y, por tanto, más "fuga" del flujo de neutrones. De modo que no hace que el agua sea radiactiva. El calor de los manantiales termales es uno de un cubo de masa crítica es más masivo que una esfera de masa crítica. (Imagínalo los "efectos más agradables" del decaimiento radiactivo. 81. Los huesos de dino -

de la siguiente manera: una esfera de material fisionable que es crítica será subcríti-saurio son demasiado antiguos para la datación con carbono, porque después de ca si se aplana en una forma de tortita, o se moldea en alguna otra forma, debido a ese largo lapso de tiempo queda muy poco carbono-14 en los huesos. 83. Las la mayor fuga de neutrones.) 45. Puesto que el plutonio libera más neutrones por tablillas de piedra no pueden datarse con la técnica de datación con carbono.

evento de fisión, el plutonio puede soportar más fuga de neutrones y todavía ser La piedra no ingiere carbono ni transforma dicho carbono mediante decaimiento crítico. De modo que el plutonio tiene una menor masa crítica que el uranio con radiactivo. La datación con carbono funciona para materiales orgánicos.

una forma similar. 47. El plutonio se acumula con el tiempo porque

se produce por absorción de neutrones en el de otra forma inerte U-238. 49. Un propó -

Piensa y discute

sito de un ciclo separado de agua es restringir la contaminación radiactiva del 85. A partir de su nacimiento, una población humana tiene cierta vida media, el agua del reactor con el reactor en sí y evitar la interacción de los contaminantes tiempo hasta que la mitad muere, pero esto no significa que la mitad de quienes con el ambiente exterior. Además, el ciclo de agua primario puede operar a mayor todavía viven morirán en el siguiente igual intervalo de tiempo. Para los átomos presión y, en consecuencia, a temperatura más alta (muy por arriba del punto de radiactivos, la posibilidad de "morir" (experimentar decaimiento) siempre es la ebullición normal del agua). 51. La masa de un núcleo atómico es menor que misma, sin importar la edad del átomo. Un átomo joven y un átomo viejo del mis-la suma de las masas de los nucleones separados que lo componen. Considera el mo tipo tienen exactamente la misma posibilidad de decaer en el siguiente igual trabajo que debe realizarse para separar un núcleo en sus nucleones componentes, intervalo de tiempo. Esto no es así con los humanos, para quienes la posibilidad el cual, de acuerdo con E mc 2, agrega masa al sistema. En consecuencia, los de morir aumenta con la edad. 87. Los elementos abajo del uranio en número nucleones separados son más masivos que el núcleo del cual provienen. Obser-atómico con vidas medias cortas existen como el producto del decaimiento radiac-va la gran masa por nucleón del hidrógeno en la gráfica de la Figura 34.16. El tivo del uranio u otro elemento con muy larga vida, el torio. Para los miles de millo -

núcleo de hidrógeno, un solo protón, ya está "afuera" en el sentido de que no nes de años que duran el uranio y el torio, los elementos más ligeros se renuevan de está ligado a otros nucleones. 53. Fisión y fusión son similares en que ambos manera constante. 89. Los alimentos irradiados no se vuelven radiactivos como son reacciones nucleares que liberan energía, lo que implica la transformación resultado de ser tratados con rayos gamma. Esto es así porque los rayos gamma de uno o más elementos en otros elementos. Sin embargo, también difieren en carecen de la energía para iniciar las reacciones nucleares en los átomos del alimen-formas importantes. La fisión no necesita temperaturas altas; la fusión, sí. La to que pudieran hacerlos radiactivos.

fisión involucra núcleos pesados; la fusión involucra núcleos ligeros.

Como los Capítulo 34

nombres lo indican, fisión es la separación de un núcleo, mientras que fusión es Preguntas conceptuales

la unión de núcleos. El concepto de masa crítica se aplica a la fisión, mas no a la 1. Muy poco uranio en las minas es el isótopo fisionable U-235. 3. Masa crítica fusión. 55. El cobre, número atómico 59, fusionado con cinc, número atómi-es la cantidad más allá de la cual ocurre una fisión espontánea. 5. Los dos méto-co 30, se convierte en el elemento de tierra rara praseodimio, número atómico 59.

dos fueron difusión de gas y separación centrífuga. 7. Combustible nuclear, ba-57. Se produciría aluminio. (Dos átomos de carbono se fusionan para produ-rras de control, un moderador y un fluido para extraer calor son los componentes cir manganeso, número atómico 12. La emisión beta lo cambiaría a aluminio,

número atómico 13.) 59. Si se localizara suficiente combustible de fisión, experi-menos doblada debido a relatividad. 31. La fisión de un solo núcleo de uranio mentaría en forma espontánea una reacción en cadena cuando se desencadenara produce 10 millones de veces más energía que la combustión de un solo átomo de con un solo neutrón. El combustible de fusión, por otra parte, es como el combus-carbono. 33. $E = mc^2$ indica que la masa es energía condensada. 35. Sí. Las tible fósil, no una sustancia que tenga reacción en cadena. No tiene "masa crítica"

ecuaciones de la relatividad se sostienen para rapideces cotidianas, pero difieren y puede almacenarse en cantidades grandes o pequeñas sin experimentar ignición mucho de las ecuaciones clásicas para rapideces cercanas a la rapidez de la luz.

espontánea. 61. Una gran ventaja potencial de la energía de fusión sobre la ener-Piensa y resuelve

gía de fisión tiene que ver con el combustible para cada una: el combustible de fu-37. La frecuencia y el periodo son recíprocos mutuos (consulta el Capítulo 19). Si la sión (hidrógeno pesado) es abundante en la Tierra, especialmente en los océanos frecuencia se duplica, el periodo se reduce a la mitad. Para un movimiento uniforme, del mundo, mientras que el combustible de fisión (uranio y

plutonio) es un recur-uno percibe sólo la mitad de tiempo entre destellos que se duplican en frecuencia.

so mucho más limitado. (Este desequilibrio también se sostiene a lo largo de todo Para un movimiento acelerado, la situación es diferente. Si la fuente gana rapidez el Universo.) Una segunda ventaja de la fusión tiene que ver con los subproductos: al aproximarse, entonces cada destello sucesivo tiene incluso menos distancia para mientras que la fisión produce cantidades considerables de desechos radiactivos, viajar y la frecuencia aumenta más; el periodo disminuye más, así como el tiempo.

el principal subproducto de la fusión es helio no radiactivo (aunque los neutro-c + c

c

2

nes liberados en la fusión pueden causar radiactividad en material circundante).

39. V =

=

= c

c 2 1+1

63. Se produce rutenio. (U, con número atómico 92, se divide en paladio, con 1+ 2

número atómico 46, que emite una partícula alfa con número atómico 2. Esto c

resulta en un elemento con número atómico 44, rutenio.) 65. No. El U-235

41. Para v = 0.99 c, γ es 7.1. La cantidad de movimiento del autobús es más que siete (con su vida media más corta) experimenta un decaimiento radiactivo seis veces veces mayor de lo que se calcularía si la mecánica clásica fuera válida. Lo mismo es más rápido que el U-238 (vida media 4.5 mil millones de años), de modo que cierto de los electrones, o cualquier cosa que viaje con esta rapidez. 43. El valor de γ

el uranio natural en una Tierra más vieja contendría un porcentaje mucho me-a v = 0.10 c es 1/ 1 (v 2 c

/ 2) 1/ 1 (0.10)2

−

=

−

= 1/ 1− 0.01 = 1/ 0.99 = 1.005..

nor de U-235, no suficiente como para una reacción crítica sin enriquecimiento.

Tú medirías que la siesta del pasajero dura 1.005(5 m) = 5.03 min. 45. El valor (Por el contrario, en una Tierra más joven, el uranio natural contendría un por-2

2

2

centaje mayor de U-235 y sostendría más fácilmente una reacción en cadena.) de γ a v = 0.5 c es 1/ 1+ (v c

/) = 1/ 1− (0.5) = 1/ 1− 0.25 = 1/ 0.75 = 1.15.

Al multiplicar 1 h de tiempo de taxi por γ se obtiene 1.15 h de tiempo Tierra. La Piensa y discute

nueva paga del conductor será (10 h)(1.15) = 11.5 estelares por este viaje.

67. Para predecir la energía liberada por una reacción nuclear, simplemente encuentra la diferencia entre la masa del núcleo de partida y la masa de su configura-Piensa y clasifica

ción después de la reacción (ya sea fisión o fusión). Esta diferencia de masa (llama-47. C, B, A

da "defecto de masa") puede encontrarse a partir de la curva de la Figura 34.16 o Piensa y explica

a partir de una tabla de masas nucleares. Multiplica esta diferencia de masa por la 49. Sólo puede percibirse el movimiento acelerado,

no el movimiento uniforme.

rapidez de la luz al cuadrado: E = mc 2. ¡Ésta es la energía liberada! 69. Fusionar Podrías no detectar tu movimento cuando viajes de manera uniforme, pero el mo-núcleos pesados (que es la forma en la que se elaboran los elementos transuránicos) vimiento acelerado podría detectarse con facilidad si observas que la superficie del cuesta energía. La masa total de los productos es mayor que la masa total de los agua en un tazón no está horizontal. 51. En el caso de un haz de luz que brilla núcleos fusionados. 71. Se liberaría energía por la fisión del oro y la fusión del desde lo alto de un vagón en movimiento, el haz de luz tiene la misma rapidez en carbono, pero ni por fisión ni por fusión del hierro. Ni fisión ni fusión resultan en relación con el suelo que la que tiene en relación con el tren. La rapidez de la luz es la una disminución de masa del hierro. 73. Si la masa por nucleón variara de acuer-misma en todos los marcos de referencia. 53. La rapidez promedio de la luz en un do con la forma de la curva de la Figura 34.15, y no de la curva de la Figura 34.16, medio transparente es menor que c, pero en el modelo de luz analizado en el Ca-entonces la fisión de todos los elementos liberaría energía y todos los procesos de pítulo 26, los fotones que constituyen el haz viajan a c en el vacío que se encuentra fusión absorberían en lugar de liberar energía. Esto es así porque todas las reaccio-entre los átomos del material. Por tanto, la rapidez de fotones individuales siempre nes de fisión (reducción de número atómico) resultarían en núcleos con menos es c. En cualquier caso, el postulado de Einstein es que la rapidez de la luz en el masa por nucleón, y todas las reacciones de fusión (aumento de número atómico) espacio libre es invariante. 55. No se transporta ninguna energía o información resultarían en lo opuesto: núcleos con mayor masa por nucleón. 75. El uranio perpendicular al haz barrido. 57. Todo es cuestión de velocidad relativa. Si dos inicial tiene más masa que los productos de fisión. 77. La energía proveniente marcos de referencia están en movimiento relativo, entonces los eventos pueden del Sol es la principal fuente de energía, que en sí misma es la energía de fusión.

ocurrir en el orden AB en un marco y en el orden BA en el otro marco. 59. Sí.

Aprovechar dicha energía en la Tierra ha resultado ser un reto descomunal. 79.

Si la distancia que la nave avanza hacia adelante en el tiempo que tarda la luz en Tal especulación podría llenar volúmenes. La

abundancia de energía y materia-llegar al extremo posterior es mayor que la distancia que se desplazó la bombilla, el les que es el posible resultado de una era de fusión probablemente produciría observador exterior todavía verá la luz que llega primero a la parte posterior. 61.

varios cambios fundamentales. Los cambios obvios ocurrirían en los campos del Cuando se dice que la luz recorre cierta distancia en 20,000 años, se habla de la comercio. Además, el calentamiento global generado por el ser humano se redu-distancia en el marco de referencia propio. Desde el marco de referencia de un ciría enormemente. Se evitarían las guerras regionales por la escasez de petróleo.

astronauta viajero, esta distancia bien podría ser más corta, acaso incluso tan corta Probablemente más recursos llegarían a las regiones subdesarrolladas del mun -

que el astronauta podría cubrirla en 20 años de su tiempo (viajando, para estar do. Una era de fusión probablemente vería cambios que tocarían cada faceta de la seguro, con una rapidez cercana a la rapidez de la luz). En un futuro distante, los vida humana. 81. En mil millones de años, habrá poco suministro de U-235 y astronautas podrían viajar a destinos a muchos años luz de distancia en cuestión de la potencia de fisión probablemente será cosa del pasado.

meses en su marco de referencia. 63. Una gemela que realiza un largo viaje con Capítulo 35

rapidez relativista regresa más joven que su hermana gemela quien se quedó en casa, Preguntas conceptuales

pero ambas son más viejas que cuando se separaron. Si pudieran verse durante el 1. Tu rapidez en relación con el suelo es 61 km/h. 3. FitzGerald planteó la hi-viaje, no habría ningún momento donde alguna viera una inversión del envejeci-pótesis de que el aparato experimental se encogía. 5. Las leyes de la naturaleza miento, sólo un retraso o aceleración del envejecimiento. Una inversión hipotética son las mismas en los marcos de referencia con movimiento uniforme. 7. Las resultaría sólo para rapideces mayores que la rapidez de la luz. 65. Si estuvieras distancias son iguales vistas en el marco de referencia de la nave espacial. 9. Hay en una nave con gran rapidez (o sin rapidez), no observarías cambios en tu pulso tres dimensiones para espacio y una cuarta dimensión para tiempo. 11. La razón o en tu volumen. Esto es así porque la velocidad entre el

observador (esto es, tú es una constante, la rapidez de la luz. 13. El "estiramiento" del tiempo se llama mismo) y lo observado es cero. No ocurre un efecto relativista para el observador y dilatación del tiempo. 15. Las mediciones del tiempo difieren por 1.15 a la mitad lo observado cuando ambos están en el mismo marco de referencia. 67. También de la rapidez de la luz. A 99.5%, las mediciones del tiempo difieren por un fac -

te ven más pequeño. 69. Sí, aunque sólo las grandes rapideces son significativas.

tor de 10. 17. Al aproximarse a ti, los destellos aparecen con más frecuencia.

Los cambios a rapideces bajas, aunque están ahí, son imperceptibles. 71. Se mide 19. Para la fuente que se aleja, los destellos se ven con el doble de separación.

que la densidad de un cuerpo en movimiento aumenta debido a una reducción 21. El valor máximo ocurre cuando las rapideces v c; entonces c c / c 1. El en volumen para la misma masa. 73. Para la ecuación de la rapidez de la luz, 1 2

valor más pequeño es cero cuando o v o v son cero. 23. Un obstáculo es la ener-v es c. Antes de desarrollarse la relatividad, c podía tener un valor en un marco de 1

2

gía que se necesita; otro es el blindaje que encuentra la radiación. 25. Lanzado referencia y un valor diferente en otro marco. Dependía del movimiento del obser-a 99.5% de la rapidez de la luz, el metro parecería ser un décimo de su longitud vador. De acuerdo con la relatividad, c es una constante, la misma para todos los original. 27. En tu propio marco de referencia, no ocurriría contracción de la observadores. 75. El metro debe orientarse en una dirección perpendicular a su longitud local. 29. Las partículas con gran rapidez muestran una trayectoria movimiento, a diferencia de una lanza arrojada de manera adecuada. Esto se debe

a que el metro viaja con una rapidez relativista (en realidad, 0.87 c) como lo de-o no su visión. Durante un eclipse, puedes ver mejor el

efecto de doblamiento muestra su aumento en cantidad de movimiento. El hecho de que su longitud no si comparas los desplazamientos de las estrellas en el otro lado del Sol. 31. La se altere significa que su dirección larga no está en la dirección de movimiento. El distorsión del Sol al atardecer se debe a la refracción atmosférica, lo que no ocurre grosor del metro, no la longitud del metro, aparecerá encogido a la mitad. 77.

en la Luna debido a que carece de atmósfera. La desviación gravitacional de la luz La cantidad de movimiento de la nave es el doble del valor clásico si su longi-es muy ligera para ver que roza la Luna o la Tierra. 33. El cambio de energía en tud medida es la mitad de su longitud normal. 79. Para los electrones en mo-la luz se demuestra con un cambio en la frecuencia. Si la energía de la luz se reduce, vimiento, la contracción de la longitud reduce la longitud aparente del tubo de como al viajar contra un intenso campo gravitacional, su frecuencia se reduce, y 2 millas de largo. Puesto que su rapidez es casi la rapidez de la luz, la contracción es se dice que la luz está gravitacionalmente corrida al rojo. Si la energía de la luz au-grande. 81. Para hacer que los electrones golpeen la pantalla con cierta rapidez, menta, como cuando cae en un campo gravitacional, la Luna, monitorizada desde deben tener más cantidad de movimiento y más energía que si fuesen partículas no Tierra, corre un poco más rápido y está ligeramente corrida al azul. Aun cuando relativistas. La energía adicional la proporciona la compañía eléctrica. ¡La factura las señales que escapan de la Luna están corridas al rojo al ascender el campo gravi-eléctrica es más grande! 83. E mc 2 significa que energía y masa son dos lados tacional de la Luna, están corridas al azul aún más al descender a través del campo de la misma moneda, masa-energía. c 2 es la constante de proporcionalidad que g más intenso de la Tierra, lo que resulta en un corrimiento al azul neto. 37. Un vincula las unidades de energía y masa. En un sentido práctico, energía y masa son reloj correría un poco más lento. Para los observadores en la Tierra, esto se debe a una y la misma. Cuando algo gana energía, gana masa. Cuando algo pierde ener-que un reloj que se mueve desde un polo hacia el ecuador se mueve en la dirección gía, pierde masa. La masa es simplemente energía condensada. 85. Sí, porque de la fuerza centrífuga, lo cual frena la tasa a la que corre el reloj (lo mismo que si contiene más energía potencial, que tiene masa. 87. Respuesta abierta.

se moviera en la dirección de una fuerza gravitacional). Para los observadores afuera Piensa y discute

en un marco inercial, el enlentecimiento del reloj en el ecuador es un ejemplo de 89. Michelson y Morley consideraron su experimento un fracaso porque no confir-dilatación del tiempo, un efecto de la relatividad especial causado por el movimien-mó el resultado que esperaban, a saber, que encontrarían y medirían diferencias en la to del reloj. (La situación es muy parecida a la que se muestra en la Figura 36.9.) velocidad de la luz. No se encontraron tales diferencias. El experimento fue exitoso 39. Al subir en un edificio se va en una dirección opuesta a la dirección de la fuerza en cuanto a que abrió las puertas a nuevos conocimientos de la física. 91. No.

gravitacional, y esto acelera el tiempo. La persona preocupada por vivir un poco Rapidez y frecuencia son completamente diferentes una de otra. La frecuencia, cuán más deberá vivir a nivel del suelo. Estrictamente hablando, las personas que viven frecuente, no es lo mismo que la rapidez, cuán rápido. 93. Datos experimentales en en los penthouse viven vidas más rápidas. 41. Los fotones de luz ascienden contra aceleradores han demostrado una y otra vez que, conforme se pone más y más ener-el campo gravitacional y pierden energía. Menos energía significa menor frecuen-gía en una partícula, la partícula nunca alcanza la rapidez de la luz. Su cantidad de cia. Tu amiga ve la luz corrida al rojo. La frecuencia que recibe es menor que la movimiento crece sin límite, pero su rapidez no. Conforme se aproxima a la rapidez frecuencia que tú envías. 43. El astronauta que cae hacia el agujero negro vería el de la luz, la cantidad de movimiento de la partícula tiende al infinito. Hay una resis-resto del Universo corrido al azul. La escala de tiempo del astronauta se enlentece, tencia infinita para cualquier aumento adicional en cantidad de movimiento y, por lo cual hace que las escalas de tiempo en cualquiera otra parte parezcan rápidas para tanto, en rapidez. De modo que c es el límite de rapidez para partículas materiales.

el astronauta. El corrimiento al azul también puede entenderse como el resultado (Del mismo modo, la energía cinética se aproxima al infinito conforme se aproxima de la gravedad del agujero negro que añade energía a los fotones que "caen" hacia el a la rapidez de la luz.) 95. No. La masa del material radiactivo disminuye, pero agujero negro. La energía añadida significa mayor frecuencia. 45. Sí. Si la estrella la masa del contenedor de plomo aumenta, de modo que no resulta un cambio de es suficientemente masiva y está suficientemente concentrada, su gravedad debe ser masa neto. Ha habido una redistribución de energía dentro del sistema trozo-con-tan fuerte como para hacer que la luz siga una trayectoria circular. Esto es lo que tenedor, pero no un cambio en la energía total y, por tanto, no hay un cambio en la luz hace en el "horizonte de eventos"

de un agujero negro. 47. Sí, así como un masa. 97. En este momento hay dos enormes obstáculos para la práctica del "salto paso en cualquier dirección desde el Polo Norte es un paso hacia el sur. 49. Sí, las centenario". Primero, aunque se tienen los medios para acelerar fácilmente partículas estrellas binarias que se mueven en torno a un centro de masa común radian ondas atómicas a rapideces que se aproximan a la rapidez de la luz, todavía no se tienen gravitacionales, como lo hacen las masas en aceleración. 51. La masa oscilatoria medios para impulsar un cuerpo tan masivo como una nave espacial habitada a rapi-

(o, de manera más general, la masa acelerada) es el mecanismo para la emisión de deces relativistas. Segundo, si los hubiera, en la actualidad no hay forma de blindar a ondas gravitacionales, como la carga en oscilación o acelerada es el mecanismo para los ocupantes de tal nave de la radiación que resultaría de las colisiones a gran rapidez la emisión de ondas electromagnéticas. Cuando se absorbe, una onda gravitacional con materia interestelar. 99. En lugar de decir que la materia no puede ni crearse puede poner a oscilar una masa, como una onda electromagnética absorbida puede ni destruirse, es más exacto decir que masa-energía no pueden crearse ni destruirse.

poner a oscilar una carga. (Los científicos que buscan detectar ondas gravitacionales intentan detectar pequeñas oscilaciones de materia causadas por la absorción de Capítulo 36

las ondas; consulta la Figura 36.16.) 53. El Universo plano se expande por siem-Preguntas conceptuales

pre. 55. Respuesta abierta.

1. La principal diferencia es la aceleración en la teoría de la relatividad general. 3. Las observaciones hechas en un marco de referencia acelerado son in-Piensa y discute

distinguibles de las observaciones hechas en un campo gravitacional newtonia-57. No. El viejo Julio falló en esta ocasión. Al viajar a la deriva en una nave por no. 5. Sólo durante un eclipse pueden verse las estrellas que de algún modo el espacio, ya sea bajo la influencia de la Luna, la Tierra o cualquier otro campo están detrás del Sol. 7. El reloj más lento es el que está en la orilla del lago gravitacional, tanto la nave como sus ocupantes están en un estado de caída libre, Michigan. 9. Se ve que el tiempo frena. 11. La ley de gravedad de Newton y en consecuencia no hay sensación de arriba o abajo. Los

ocupantes de una nave es válida para un campo gravitacional relativamente débil. 13. Cuando el disco espacial sentirían peso, o percibirían arriba o abajo, sólo si la nave acelerara, por gira, la circunferencia experimenta una contracción de la longitud, pero el diáme-decir, contra sus pies. Entonces podrían ponerse de pie y percibir que abajo es tro no. 15. Un cambio en movimiento produce ondas gravitacionales. 17. Las hacia sus pies y arriba es lejos de sus pies. 59. Prudencia es más vieja. El tiempo ondas gravitacionales son difíciles de detectar debido a su debilidad. 19. La física de Caridad corre más lento durante la época que ella está en el borde del reino newtoniana de hecho fue primordial para llevar al ser humano a la Luna.

giratorio (consulta la Figura 36.9).

Piensa y explica

Apéndice E (Crecimiento exponencial y tiempo de duplicación)

21. Los marcos de referencia que se aplican a la relatividad especial son de movi-1. El estanque está cubierto a la mitad el día 29 y cubierto a un cuarto el día 28.

miento uniforme: velocidad constante. Los marcos de referencia que se aplican a la La cobertura se duplica cada día. 3. A una tasa de inflación estable de 3.5%, el relatividad general incluyen marcos acelerados. 23. Un astronauta, cuando está tiempo de duplicación es 70/3.5% = 20 años; de modo que cada 20 años los pre-en órbita, aunque en manos de la gravedad de la Tierra, está ingrávido porque no cios de estos artículos se duplicarán. Esto significa que el boleto de teatro de $50

hay fuerza de sostén (como se explicó en el Capítulo 9). Tanto el astronauta como en 20 años costará $100, en 40 años costará $200, y en 60 años costará $400. El la nave espacial están juntos en caída libre. 25. La distancia de separación de dos abrigo de $500 igualmente saltará cada 20 años a $1,000, $2,000 y $4,000. Para personas que caminan hacia el norte desde el ecuador de la Tierra disminuye, y un automóvil de $50,000, los saltos en precio cada 20 años producen $100,000, si continúan hacia el Polo Norte, su distancia de separación será cero. En el Polo $200,000 y $400,000. Para una casa de $500,000, ¡los saltos en precio cada 20 años Norte, ¡un paso en cualquier dirección es un paso al sur! 27. En el entorno co-son $1,000,000, $2,000,000 y $4,000,000! 5. Si todas las cosas se conservan tidiano no se percibe el doblamiento de la luz

por la gravedad porque la gravedad iguales, la duplicación de la producción de alimento para el doble del número de que se experimenta es muy débil para crear un efecto notable. Para distancias que personas simplemente significa que el doble de personas comerá y el doble morirá usan los topógrafos, un haz de luz es la mejor aproximación conocida de una línea de hambre y como mueren ahora. 7. En el día 30, tu salario será $5,368,709.12, recta. 29. De acuerdo. La luz de las estrellas se dobla ya sea que la Luna obstruya que es un centavo más que el total de $5,368,709.11 de todos los días anteriores.

Glosario

A (a) Abreviatura de ampere. (b) Cuando es a minúscula cursiva, sím-Altura. La impresión subjetiva acerca de lo "alto" o "bajo" de un bolo de aceleración.

tono, que se relaciona con la frecuencia del tono. Una fuente que

Aberración. Distorsión de una imagen producida por una lente o vibra a alta frecuencia produce un sonido de gran altura; una fuen-espejo, causada por limitaciones inherentes en cierto grado en

te que vibra a baja frecuencia produce un sonido de poca altura.

todos los sistemas ópticos. Véanse aberración esférica y aberración AM. Abreviatura de amplitud modulada.

cromática.

Ampere (A). Unidad del SI de corriente eléctrica. Un ampere es un Aberración cromática. Distorsión de una imagen causada cuando flujo de un coulomb de carga por segundo: 6.25 1018 electrones

luz de diferentes colores (y, por tanto, con diferentes rapideces y

(o protones) por segundo.

refracciones) se enfoca en distintos puntos cuando pasa a través de

Amperímetro. Dispositivo que mide corriente. Véase galvanómetro.

un lente. Los lentes acromáticos corrigen este defecto al combinar

lentes simples fabricados con diferentes tipos de vidrio.

Amplitud. Para una onda o vibración, desplazamiento máximo hacia

cualquier lado de la posición de equilibrio (punto medio).

Aberración esférica. Distorsión de una imagen causada cuando la luz que pasa a través de los bordes de una lente se enfocan en

Amplitud modulada (AM). Tipo de modulación en el que la ampli-puntos ligeramente diferentes del punto donde se enfoca la luz que

tud de la onda portadora de radiofrecuencia varía por arriba y aba-

atraviesa el centro del lente. También ocurre con espejos esféricos.

jo de su valor normal en una cantidad proporcional a la amplitud

de la señal impresa.

AC. Abreviatura de corriente alterna.

Análisis de Fourier. Método matemático que descompone cualquier Aceleración (a). Tasa a la que la velocidad de un objeto cambia con forma ondulatoria periódica en una combinación de ondas sinu-el tiempo; el cambio en la velocidad puede ser de magnitud (rapi-

soidales simples.

dez), dirección o ambos.

Ángulo crítico. Ángulo de incidencia mínimo para el cual un rayo de cambio de velocidad

Aceleración =

luz se refleja totalmente dentro de un medio.

intervalo de tiempo

Ángulo de incidencia. Ángulo entre un rayo incidente y la normal Aceleración debida a la gravedad (g). Aceleración de un objeto en respecto de la superficie que encuentra.

caída libre. Su valor cerca de la superficie de la Tierra es de aproxi-Ángulo de reflexión. Ángulo entre un rayo reflejado y la normal res-madamente 9.8 m/s2 (9.8 m/s cada segundo).

pecto de la superficie de reflexión.

Acústica. Estudio de las propiedades del sonido, en especial su trans-

Ángulo de refracción. Ángulo entre un rayo refractado y la normal misión.

respecto de la superficie donde se refracta.

Adhesión. Atracción molecular entre dos superficies que están en Antimateria. Materia compuesta de átomos con núcleos negativos y contacto.

electrones positivos.

Adiabático. Término aplicado a la expansión o compresión de un gas Antinodo. Cualquier parte de una onda estacionaria con máximo que ocurre sin ganancia o pérdida de calor.

desplazamiento y máxima energía.

Agua pesada. Agua (H2O) que contiene el isótopo de hidrógeno pe- Antipartícula. Partícula que tiene la misma masa que una partícu- sado deuterio; puede escribirse D2O.

la normal, pero una carga del signo opuesto. La antipartícula del

Agujero de gusano. Enorme distorsión hipotética del espacio y del electrón es el positrón.

tiempo, similar a un agujero negro, pero que se abre de nuevo en

Antiprotón. Antipartícula del protón; un protón con carga negativa.

alguna otra parte del espacio-tiempo.

Año luz. Es la distancia que recorre la luz en el vacío en un año: Agujero negro. Concentración de masa que resulta del colapso gravi-9.46 1012 km.

tacional, en cuya cercanía la gravedad es tan intensa que ni siquiera la luz puede escapar.

Apogeo. Punto en una órbita elíptica más alejado del foco en torno al cual la órbita tiene lugar. Véase también perigeo.

Aislante. (a) Material que es un mal conductor del calor y que demora la transferencia de calor. (b) Material que es mal conductor

Armadura. Parte de un motor o generador eléctrico donde se produ- de la electricidad.

ce una fuerza electromotriz; por lo general, la parte giratoria.

Aleación. Mezcla sólida compuesta de dos o más metales o de un
Armónico. Véase tono parcial.

metal y un no metal.

Astigmatismo. Defecto del ojo que se produce cuando la córnea se
Alquimista. Practicante de la primera forma de química llamada al-
curva más en una dirección que en otra.

quimia, que se asociaba a la magia. La meta de la alquimia era

Aterrizar. Dejar que las cargas se muevan libremente a lo largo de
convertir los metales básicos en oro y descubrir una poción que

una conexión desde un conductor hasta tierra; con frecuencia se

produjera juventud eterna.

realiza por seguridad.

GLOSARIO

Átomo. Partícula más pequeña de un elemento que tiene todas las
Calor de fusión. Cantidad de energía que debe agregarse a un kilo-
propiedades químicas del elemento; consiste en protones y neutro-

gramo de un sólido (ya en su punto de fusión) para fundirlo. Véase

nes en un núcleo rodeado por electrones.

calor latente de fusión.

Audio digital. Sistema de reproducción de audio que usa código bi-
Calor de vaporización. Cantidad de energía que debe agregarse a
nario para grabar y reproducir sonido.

un kilogramo de un líquido (ya en su punto de ebullición) para

Aurora boreal. Brillo de la atmósfera causado por los iones que se
evaporarlo. Véase calor latente de vaporización.

encuentran arriba de la atmósfera y se zambullen en ésta; también

Calor latente de fusión. Cantidad de energía necesaria para cambiar se les llama luces del norte. En el hemisferio sur se llama aurora

una unidad de masa de una sustancia de sólido a líquido (y vice-

austral.

versa si dicha cantidad de energía se retira). Véase calor de fusión.

Autoinducción. Inducción de un campo eléctrico dentro de una sola
Calor latente de vaporización. Cantidad de energía necesaria para bobina, causada por la interacción de las espiras dentro de la mis-
cambiar una unidad de masa de una sustancia de líquido a gas (y

ma bobina. Este voltaje autoinducido siempre está en una direc-

viceversa). Véase calor de vaporización.

ción opuesta al voltaje variable que lo produce y comúnmente se

Caloría (cal). Unidad de calor. Una caloría es el calor necesario para denomina fuerza contraelectromotriz o contra-fem.

aumentar en 1 grado Celsius la temperatura de 1 gramo de agua.

Barómetro. Dispositivo usado para medir la presión de la atmósfera.

Una Caloría (con C mayúscula) es igual a 1,000 calorías y es la
Barómetro aneroide. Instrumento utilizado para medir la presión unidad usada para describir la energía disponible de los alimentos;

atmosférica; se basa en el movimiento de la tapa de una caja metá-

también se llama kilocaloría (kcal).

lica, y no en el movimiento de un líquido.

1 cal 5 4.19 J o 1 J 5 0.24 cal

Barrera de sonido. La acumulación de ondas sonoras enfrente de un
Cámara de niebla. Dispositivo que sirve para detectar las trayectorias avión que se aproxima o que alcanza la rapidez del sonido; en los

de las partículas emitidas por fuentes radiactivas.

albores de la aviación jet se creía que afectaba el control de la ae-

Campo de fuerza. Aquello que existe en el espacio alrededor de una ronave al crear una barrera de sonido que un avión debía romper

masa, carga eléctrica o imán, de modo que otra masa, carga eléc-

para ir más rápido que la rapidez del sonido. La barrera del sonido

trica o imán introducido en esta región experimentará una fuerza.

no existe.

Ejemplos de campos de fuerza son los campos gravitacionales, eléc-

Bastones. Véase retina.

tricos y magnéticos.

Batimientos. Secuencia de reforzamientos y cancelaciones alternados Campo eléctrico. Campo de fuerza que llena el espacio alrededor de de dos conjuntos de ondas superpuestas que difieren en frecuencia;

toda carga eléctrica o grupo de cargas; se mide mediante la fuerza

se escucha como un sonido de palpitación.

sobre la carga (newtons/coulomb).

bel. Unidad de intensidad del sonido, llamada así en honor de Alexan-Campo gravitacional. Campo de fuerza que existe en el espacio alder Graham Bell. El umbral de audición es 0 bel (10212 W/m2).

rededor de toda masa o grupo de masas; se mide en newtons por

Suele medirse en decibeles (dB, un décimo de bel).

kilogramo.

Big Bang. Explosión primordial que se cree que resultó en la creación Campo magnético. Región de influencia magnética alrededor de un del Universo en expansión.

polo magnético o una partícula cargada en movimiento.

Bioluminiscencia. Luz emitida por ciertos seres vivos que tienen la

Cantidad de movimiento. Inercia en movimiento. El producto de la capacidad de excitar químicamente moléculas en sus cuerpos; des-masa y la velocidad de un objeto (siempre que la rapidez sea mucho

pués, dichas moléculas excitadas producen luz visible.

menor que la rapidez de la luz). La cantidad de movimiento tiene

magnitud y dirección y, por tanto, es una cantidad vectorial. También Biomagnetismo. Material magnético ubicado en los organismos vi-llamada cantidad de movimiento lineal y se abrevia p.

vos que puede ayudarlos a navegar, localizar alimento y realizar

otros comportamientos.

p 5 mv

Bomba térmica. Tipo de máquina térmica que saca calor de un am-Cantidad de movimiento angular. Producto de la inercia rotacional biente frío y lo lleva a un ambiente caliente.

de un cuerpo y su velocidad rotacional alrededor de un eje par-

ticular. Para un objeto que es pequeño comparado con la distancia

Brazo de palanca. Distancia perpendicular entre un eje y la línea radial, su magnitud es el producto de la masa, la rapidez y la dis-de acción de una fuerza que tiende a producir rotación en torno

tancia radial desde el eje de rotación.

a dicho eje.

Cantidad de movimiento angular 5 mvr

BTU. Abreviatura de unidad térmica británica (del inglés, british thermal unit).

Cantidad de movimiento lineal. Producto de la masa y la velocidad de un objeto; también llamada cantidad de movimiento. (Esta defiC. Abreviatura de coulomb.

nición se aplica a rapideces mucho menores que la rapidez de la luz.) Caída libre. Movimiento que está sólo bajo la influencia de la gravedad.

Cantidad escalar. Cantidad en física, como la masa, el volumen y el Calentamiento global. Véase efecto invernadero.

tiempo, que pueden especificarse completamente por su magnitud

Calidad. Sonido característico de un instrumento musical o voz, que y no tiene dirección.

está gobernado por el número y las intensidades relativas de los

Cantidad vectorial. Cantidad en física que tiene tanto magnitud tonos parciales. Se relaciona con el patrón de la onda sonora. Tam-como dirección. Son ejemplos fuerza, velocidad, aceleración, mo-

bién llamado timbre, tono y calidad tonal.

mento de torsión, y los campos eléctricos y magnéticos.

Calor. Energía que "fluye" de un objeto a otro en virtud de una dife-Capacidad calorífica específica. Cantidad de calor necesaria para rencia de temperatura; se mide en calorías o joules.

aumentar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia

en 1 grado Celsius (o, de manera equivalente, en 1 kelvin); a me-

Colores complementarios. Cualesquiera dos colores de luz que, nudo sólo se le llama calor específico.

cuando se suman, producen luz blanca.

Capacitor. Dispositivo utilizado para almacenar carga en un circuito.

Colores primarios. Véanse colores primarios aditivos y colores prima-Capilaridad. Elevación de un líquido por un delgado tubo hueco o rios sustractivos.

en un espacio estrecho.

Colores primarios aditivos. Tres colores de luz (rojo, azul y verde, Carga eléctrica. Propiedad eléctrica fundamental a la que se atribuye por ejemplo) que, cuando se suman en ciertas proporciones,

pro-la atracción o repulsión mutua entre electrones o protones.

ducirán cualquier color del espectro.

Carga por contacto. Transferencia de carga eléctrica entre objetos al
Colores primarios sustractivos. Los tres colores de pigmentos que
frotarlos o simplemente al tocarlos.

absorben luz (magenta, amarillo y cian, por ejemplo) que, cuando

se mezclan en ciertas proporciones, reflejan cualquier color en el

Carga por inducción. Redistribución de cargas eléctricas en y sobre
espectro.

los objetos causada por la influencia eléctrica de un objeto cargado

que está cercano pero no en contacto.

Complementariedad. Principio enunciado por Niels Bohr que afirma
que los aspectos ondulatorio y corpuscular, tanto de la materia

CD. Abreviatura de corriente directa.

como de la radiación, son partes necesarias y complementarias del

Celda de combustible. Dispositivo que convierte energía química
todo. Cuál parte se enfatiza depende de qué experimento se realice

en energía eléctrica pero, a diferencia de una batería, se alimenta

(es decir: de qué preguntas plantea uno a la naturaleza).

de manera continua con combustible, por lo general hidrógeno.

Componente. Uno de los vectores perpendiculares que suman en to-
Centro de gravedad (CG). Punto en el centro de la distribución de tal
un vector particular (por ejemplo, las componentes horizontal

peso de un objeto, donde puede considerarse que actúa la fuerza

y vertical de la velocidad).

de gravedad.

Compresión. (a) En mecánica, el acto de oprimir un material y redu-
Centro de masa. Punto en el centro de la distribución de masa de un

cir su volumen. (b) En sonido, la región de aumento de presión en

objeto, donde puede considerarse que se concentra toda su masa.

una onda longitudinal.

Para condiciones cotidianas, es lo mismo que el centro de gravedad.

Compuesto. Sustancia química hecha de átomos de dos o más ele-
Cero absoluto. Temperatura más baja posible que puede tener cual-
mentos diferentes combinados en una proporción fija.

quier sustancia; temperatura a la que los átomos de una sustancia

Condensación. Cambio de fase de un gas a un líquido; lo opuesto
tienen su energía cinética mínima. La temperatura del cero absolu-de
la evaporación.

to es 2273.158C, que es 2459.78F y 0 K.

Conducción. (a) En calor, transferencia de energía de partícula a
par-CG. Abreviatura de centro de gravedad.

tícula en el interior de ciertos materiales, o de un material a otro

Chinook. Viento seco y cálido que sopla desde el lado este de las
Mon-cuando los dos están en contacto directo. (b) En electricidad, el

tañas Rocosas y atraviesa las grandes planicies estadounidenses.

flujo de carga eléctrica a través de un conductor.

Ciclotrón. Acelerador de partículas que imparte alta energía a partí-
Conductor. (a) Material a través del cual se puede transferir el
calor.

culas cargadas como protones, deuterones e iones helio.

(b) Material, en general un metal, a través del cual puede fluir la

Cinturones de radiación Van Allen. Dos cinturones de radiación,
carga eléctrica. Por lo general, los buenos conductores de calor son

con forma de dona, que rodean la Tierra.

buenos conductores de carga eléctrica.

Circuito. Cualquier trayectoria completa a lo largo de la cual puede fluir carga eléctrica. Véanse también circuito en serie y circuito en paralelo.

Conos. Véase retina.

Circuito en paralelo. Circuito eléctrico con dos o más dispositivos conectados de tal forma que el mismo voltaje actúa a través de cada uno y cualquiera completa el circuito independientemente de los otros. Véase también en paralelo.

Circuito en serie. Circuito eléctrico con dispositivos conectados de tal forma que la corriente eléctrica a través de cada uno de ellos es la misma. Véase también en serie.

Conservación de carga. Principio de que la carga eléctrica neta no se crea ni se destruye, sino que se transfiere de un objeto a otro.

Conservación de energía. Principio de que la energía no puede crearse ni destruirse. Se puede transformar de una forma en otra, o transferirse de un objeto a otro, pero la cantidad total de energía permanece constante.

Conservación de cantidad de movimiento angular. Cuando no actúa un momento de torsión externo sobre un objeto o un sistema de objetos, no ocurre ningún cambio en la cantidad de movimiento angular. Por tanto, la cantidad de movimiento angular antes de un evento que implique sólo momentos de torsión internos es igual a la cantidad de movimiento angular después del evento.

Congelación. Cambio de fase de líquido a sólido; lo opuesto de la fusión.

Conservación de la cantidad de movimiento angular. Cuando no actúa un momento de torsión externo sobre un objeto o un sistema de objetos, no ocurre ningún cambio en la cantidad de movimiento angular. Por tanto, la cantidad de movimiento angular antes de un evento que implique sólo momentos de torsión internos es igual a la cantidad de movimiento angular después del evento.

Código binario. Código basado en el sistema de números binarios (que usa una base 2). En código binario, cualquier número puede expresarse como una sucesión de 1 y 0. Por ejemplo, el número 1 es 1, 2 es 10, 3 es 11, 4 es 100, 5 es 101, 17 es 10001, y así sucesivamente. Estos 1 y 0 pueden luego interpretarse y transmitirse

nunca cambia.

electrónicamente como una serie de pulsos “encendido” y “apaga-

Conservación de energía para máquinas. La salida de trabajo de do”, la base de todas las computadoras y otros equipos digitales.

cualquier máquina en estado estacionario no puede exceder el tra-

Colisión elástica. Colisión en la que los objetos que chocan rebotan bajo de entrada.

sin deformación duradera ni generación de calor.

Conservación de la cantidad de movimiento. En ausencia de una Colisión inelástica. Colisión en la que los objetos que chocan se dis-fuerza externa neta, la cantidad de movimiento de un objeto o

torsionan y/o generan calor durante la colisión, y posiblemente

sistema de objetos no cambia.

quedan unidos.

mv(antes del evento) 5 mv(después del evento)

Conservada. Término que se aplica a una cantidad física, como la corrimiento al rojo porque la disminución es hacia el extremo cantidad de movimiento, la energía o la carga eléctrica, que perma-de baja frecuencia, o rojo, del espectro de color. Véase también

nece invariable durante las interacciones.

efecto Doppler.

Constante de gravitación universal. La constante de proporcionali-Corrimiento gravitacional al rojo. Corrimiento en longitud de dad G que mide la intensidad de la gravedad en la ecuación de la onda hacia el extremo rojo del espectro experimentado por la luz

ley de gravitación universal de Newton.

que sale de la superficie de un objeto masivo, según predice la

m m

teoría de la relatividad general.

1

2

m m

F

1

2

2

o F = G

d

d 2

Cortocircuito. Interrupción en un circuito eléctrico causada por el flujo de carga a lo largo de una trayectoria de baja resistencia entre
Constante de Planck (h). Constante fundamental de la teoría cuándos puntos que no deben estar directamente conectados, lo que

tica que determina la escala del mundo a pequeña escala.

por tanto desvía la corriente de su trayectoria adecuada; un efecti-

h 6.6 10–34 J • s

vo "acortamiento del circuito".

Cuando la constante de Planck se multiplica por la frecuencia de la

Cosmología. Estudio del origen y creación de todo el Universo.

luz, esto es igual a su energía.

Coulomb (C). Unidad del SI de carga eléctrica. Un coulomb es igual
E hf

a la carga total de 6.25 1018 electrones.

Constante solar. 1,400 J/m2 recibidos del Sol cada segundo en la parte superior de la atmósfera de la Tierra; expresada en términos de potencia, 1.4 kW/m2.

Cresta. Uno de los lugares de una onda donde la onda es más alta o plo, por un factor de 2) en tiempos iguales.

Contacto térmico. Estado de dos o más objetos o sustancias en contacto de forma tal que el calor puede fluir de uno al otro.

Contador de centelleos. Dispositivo usado para medir radiación de fuentes radiactivas.

Cristal. Forma geométrica regular que suele encontrarse en un sólido donde las partículas componentes están distribuidas en un patrón tridimensional repetitivo y ordenado.

Contador Geiger. Dispositivo usado para detectar radiación proveniente del decaimiento radiactivo y mide su tasa.

Cristal dicroico. Cristal que divide la luz no polarizada en dos haces internos polarizados en ángulos rectos y absorbe poderosamente un haz al tiempo que transmite el otro.

Contaminación térmica. Calor indeseable expulsado de una máquina térmica u otra fuente.

Contracción de la longitud. Encogimiento del espacio y, por tanto, de la materia, en un marco de referencia que se mueve con rapidez relativistas.

Cuanto. De la palabra latina quantus, que significa "cuánto", un de cuanto es la unidad elemental más pequeña de una cantidad, la cantidad discreta más pequeña de algo. Un cuanto de energía electromagnética se llama fotón. Véase también mecánica cuántica y

Contracción de Lorentz. Véase contracción de la longitud.

Teoría cuántica.

Contraparte de Maxwell a la ley de Faraday. Un campo magnético
Curva de radiación de la luz solar. Véase curva de radiación solar.

se crea en cualquier región del espacio donde un campo eléctri -

co cambie con el tiempo. La magnitud del campo magnético in-

Curva de radiación solar. Gráfica de brillo frente a frecuencia (o
lon-ducido es proporcional a la tasa a la que cambia el campo eléctrico.

gitud de onda) de la luz solar.

La dirección del campo magnético inducido es en ángulos rectos

Curva sinusoidal. Curva cuya forma representa las crestas y valles
respecto del campo eléctrico variable.

de una onda, según traza un péndulo que suelta un rastro de are-

Convección. Medio de transferencia de calor por el movimiento de
na mientras se balancea en ángulo recto hacia y sobre una banda

la propia sustancia calentada, como por las corrientes en un fluido.

transportadora en movimiento.

Córnea. Recubrimiento transparente del globo ocular que ayuda a
Datación con carbono. Proceso para determinar el tiempo que ha
enfocar la luz entrante.

transcurrido desde la muerte por medio de la medición de la ra-

diactividad del carbono de una muestra debida al carbono-14 que

Corriente. Véase corriente eléctrica.

contiene.

Corriente alterna (CA). Corriente eléctrica que invierte rápido su dB.
Abreviatura de decibel. Véase bel.

dirección. Las cargas eléctricas vibran alrededor de posiciones
relativamente fijas, por lo general a la tasa de 60 Hz en Estados
Unidos.

Decaimiento exponencial. Disminución por el mismo factor (por ejemplo, por un factor de 2) en tiempos iguales.

Corriente directa (CD). Corriente eléctrica en la que el flujo de carga siempre es en una dirección.

decibel (dB). Un décimo de bel.

Corriente eléctrica. Flujo de carga eléctrica que transporta energía Declinación magnética. Discrepancia entre la orientación de una de un lugar a otro; se mide en amperes, donde 1 ampere es el flujo

brújula que apunta hacia el norte magnético y el verdadero norte

de 6.25

geográfico.

1018 electrones (o protones) por segundo.

Corrimiento al azul. Aumento de la frecuencia medida de la luz pro- Densidad. Masa de una sustancia por unidad de volumen. La den- veniente de una fuente que se acerca; se llama corrimiento al azul

sidad de peso es el peso por unidad de volumen. En general, cual-

porque el aumento aparente es hacia el extremo de alta frecuencia,

quier cantidad por elemento de espacio (por ejemplo, número de

o azul, del espectro de color. También ocurre cuando un observa-

puntos por área).

dor se aproxima a una fuente. Véase también efecto Doppler.

masa

Densidad = volumen

Corrimiento al rojo. Disminución de la frecuencia medida de la luz (u otra radiación) desde una fuente que se aleja; se llama

peso

Densidad de peso =

volumen

GLOSARIO

G-5

Desexcitación. Véase excitación.

Efecto Doppler. Cambio en frecuencia de una onda de sonido o de
Desplazado. Término aplicado al fluido que se quita del camino luz
debido al movimiento de la fuente o del receptor. Véase tam-cuando
un objeto se coloca en un fluido. Un objeto sumergido

bién corrimiento al rojo y corrimiento al azul.

siempre desplaza un volumen de fluido igual a su propio volumen.

Efecto fotoeléctrico. Expulsión de electrones de ciertos metales Un
objeto que flota siempre desplaza un peso de fluido igual a su

cuando se exponen a ciertas frecuencias de luz.

propio peso.

Efecto invernadero. Calentamiento causado por la energía radiante
Deuterio. Isótopo del hidrógeno cuyo átomo tiene un protón, un de
longitud de onda corta proveniente del Sol que entra con fa-neutrón
y un electrón. El isótopo común del hidrógeno sólo tiene

cilidad en la atmósfera y es absorbida por la Tierra, pero cuando

un protón y un electrón; por tanto, el deuterio tiene más masa.

se irradia a longitudes de onda más largas no puede escapar con

Deuterón. Núcleo de un átomo de deuterio; tiene un protón y un
facilidad de la atmósfera de la Tierra.

neutrón.

Efecto mariposa. Situación en la que un cambio muy pequeño en
Diferencia de potencial. Diferencia en el potencial eléctrico (energía
un lugar puede amplificarse y generar un gran cambio en alguna

potencial eléctrica por carga) entre dos puntos; también llamada

otra parte.

diferencia de voltaje o simplemente voltaje. Las cargas libres fluyen cuando hay una diferencia y seguirán fluyendo hasta que ambos puntos alcancen un potencial común.

Difracción. Plegamiento de la luz que pasa alrededor de un obstáculo o por una rendija estrecha, lo que hace que la luz se disperse y produzca franjas claras y oscuras.

Dilatación del tiempo. Enlentecimiento del tiempo para un objeto en movimiento según lo juzgan quienes lo ven moverse.

Diodo. Dispositivo electrónico que restringe la corriente a una sola dirección en un circuito eléctrico; un dispositivo que cambia la corriente alterna a corriente directa.

Diodo emisor de luz (LED). Diodo que emite luz.

Eficiencia. En una máquina, la razón de la energía de salida útil con respecto a la energía total de entrada, o el porcentaje del trabajo de entrada que se convierte en trabajo de salida.

Eficiencia = salida de energía útil / entrada de energía total

Eficiencia de Carnot. Porcentaje máximo ideal de energía de entrada que puede convertirse en trabajo en una máquina térmica.

Eficiencia ideal $= \frac{T_{caliente} - T_{frío}}{T_{caliente}}$

Eficiencia ideal. Límite superior de eficiencia para todas las máquinas térmicas; depende de la diferencia de temperatura entre la admisión y el escape.

Dipolo eléctrico. Molécula en la que la distribución de carga es disT caliente

pareja, lo que resulta en cargas un poco opuestas en lados opuestos

Eje. (a) Línea recta en torno a la cual la rotación tiene lugar. (b) Lí- de la molécula.

neas rectas para referencia en una gráfica; por lo general el eje x Disco versátil digital (DVD). Antes denominado disco de video di- mide el desplazamiento horizontal y el eje y mide el desplazamien- gital, es un disco compacto que contiene material de video.

to vertical.

Dispersar. Absorber sonido o luz y reemitirlo en todas direcciones.

Eje principal. Línea que une los centros de curvatura de las super- Dispersión. (a) Emisión en direcciones aleatorias de luz que encuen- ficies de una lente. Línea que une el centro de curvatura y el foco

tra partículas que son pequeñas comparadas con la longitud de

de un espejo.

onda de la luz; más a menudo en longitudes de onda cortas (azul)

Elasticidad. Propiedad de un sólido de experimentar un cambio en que en longitudes de onda largas (rojo). (b) Separación de luz en

su forma cuando una fuerza deformante actúa sobre él y regresar

colores ordenados de acuerdo con su frecuencia; por ejemplo, por

a su forma original cuando se retira la fuerza deformante.

la interacción con un prisma o una rejilla de difracción.

Eléctricamente polarizado. Término aplicado a un átomo o molécu- Disyuntor. Dispositivo en un circuito eléctrico que rompe el circuito la en la que las cargas están alineadas de modo que un lado es un

cuando la corriente se vuelve tan alta como para iniciar un incendio.

poco más positivo o negativo que el lado opuesto.

Dominio magnético. Grupo microscópico de átomos con sus cam-

Electricidad. Término general para los fenómenos eléctricos, muy pos magnéticos alineados.

parecido a como la gravedad tiene que ver con los fenómenos gra-

Ebullición. Cambio de líquido a gas que ocurre bajo la superficie vitacionales, o la sociología con los fenómenos sociales.

del líquido; vaporización rápida. El líquido pierde energía y el gas

Electrodinámica. Estudio de las cargas eléctricas en movimiento, en la gana.

oposición a la electrostática.

EC. Abreviatura de energía cinética.

Electrodo. Terminal (por ejemplo, de una batería) a través de la cual Eclipse lunar. Evento en el que la Luna llena pasa en la sombra de puede pasar corriente eléctrica.

la Tierra.

Electroimán. Imán cuyas propiedades magnéticas se producen por Eclipse solar. Evento en el cual la Luna bloquea la luz proveniente una corriente eléctrica.

del Sol y la sombra de la Luna cae sobre parte de la Tierra.

Electromagnetismo. Fenómeno asociado a los campos eléctrico y Eco. Reflexión de sonido.

magnético y sus interacciones mutuas y con cargas y corrientes

eléctricas.

Ecuación de onda de Schrödinger. Ecuación fundamental de la

mecánica cuántica, que interpreta la naturaleza ondulatoria de las

Electrón. Partícula negativa en la capa de un átomo.

partículas materiales en términos de amplitudes de onda de proba-

Electrón-volt (eV). Cantidad de energía igual a la energía que ad-bilidad. Esta ecuación es tan básica a la mecánica cuántica como

quiere un electrón cuando acelera a través de una diferencia de

las leyes de movimiento de Newton lo son para la mecánica clásica.

potencial de 1 V.

Electrones de conducción. Electrones en un metal que se mueven
Entropía. Medida del desorden de un sistema. Siempre que la ener-
libremente de átomo en átomo y portan carga eléctrica.

gía se transforma libremente de una forma en otra, la dirección

Electrostática. Estudio de las cargas eléctricas en reposo, en oposi-de
la transformación es hacia un estado de mayor desorden y, por

ción a la electrodinámica.

tanto, hacia uno de mayor entropía.

Elemento. Sustancia compuesta de átomos que tienen el mismo nú-
EP. Abreviatura de energía potencial.

mero atómico y, por tanto, las mismas propiedades químicas.

Equilibrio. En general, un estado de balance. En cuanto al equilibrio
Elemento transuránico. Elemento que está más arriba que el uranio
mecánico, estado en el que no actúan ni fuerzas netas ni momentos

en la tabla periódica.

de torsión netos. En líquidos, estado en el que la evaporación es

Elipse. Curva cerrada a manera de círculo "estirado", en la que la
igual a la condensación. De manera más general, estado en el que

suma de las distancias desde cualquier punto de la curva hasta dos

no ocurren cambios netos de energía.

puntos focales internos es una constante.

Equilibrio estable. Estado de un objeto equilibrado de modo que En
fase. Término aplicado a dos o más ondas cuyas crestas (y valles)

cualquier pequeño desplazamiento o rotación eleva su centro de

llegan a un lugar al mismo tiempo, de modo que sus efectos se

gravedad.

refuerzan entre sí.

Equilibrio inestable. Estado de un objeto equilibrado de modo que En paralelo. Término aplicado a las porciones de un circuito eléctrico cualquier pequeño desplazamiento o rotación baja su centro de

que se conectan en dos puntos y ofrecen rutas alternativas para la

gravedad.

corriente entre dichos dos puntos.

Equilibrio mecánico. Estado de un objeto o sistema de objetos para En serie. Término aplicado a las porciones de un circuito eléctrico los cuales cualquier fuerza aplicada se cancela y no ocurre aceleración que se conectan en fila, de modo que la corriente que pasa a través

ni hay un momento de torsión neto; esto es, F 0 y 0.

de una debe pasar a través de todas ellas.

Equilibrio térmico. Estado en el que las sustancias en contacto tér- Energía. Aquello que puede cambiar la condición de la materia. Si mico alcanzan una temperatura común.

bien a menudo la energía se define como la capacidad para realizar

Equivalencia masa-energía. Relación entre la masa y la energía dada trabajo, en realidad sólo se la puede describir con ejemplos.

por la ecuación:

Energía cinética (EC). Energía de movimiento; igual (no en térmi- E mc2

nos relativistas) a la masa multiplicada por el cuadrado de la rapi-

donde c es la rapidez de la luz.

dez, multiplicada por la constante 1/2.

Escala. En música, una sucesión de notas de frecuencias que están en 1

EC = mv 2

razones simples una con otra.

2

Escala Celsius. Escala de temperatura que asigna 0 al punto de fu- Energía en reposo. La "energía de ser", dada por la ecuación E mc 2.

sión-congelación del agua y 100 al punto de ebullición-conden-

Energía interna. La energía total almacenada en los átomos y molécu-sación del agua a presión estándar (1 atmósfera a nivel del mar).

las dentro de una sustancia. Los cambios en la energía interna son de Escala Fahrenheit. Escala de temperatura de uso común en Estados gran interés en la termodinámica.

Unidos. El número 32 se asigna al punto de fusión-congelación

Energía mecánica. Energía debida a la posición o al movimiento de del agua, y el número 212 al punto de ebullición-condensación del

algo; energía potencial o cinética (o una combinación de ambas).

agua a presión estándar (1 atmósfera, a nivel del mar).

Energía oscura. Nombre con el que se designa el hecho aparente de Escala Kelvin. Escala de temperatura, medida en kelvins, K, cuyo que el Universo se expande de manera acelerada.

cero (llamado cero absoluto) es la temperatura a la que es imposi-

Energía potencial (EP). Energía de posición; por lo general se rela- ble extraer más energía interna de un material; 0 K 273.15C.

ciona con la posición relativa de dos cosas, como una piedra y la

En la escala Kelvin no hay temperaturas negativas.

Tierra (EP gravitacional), o un electrón y un núcleo (EP eléctrica).

Escalamiento. Estudio de cómo el tamaño afecta las relaciones entre

Energía potencial eléctrica. Energía que posee una carga en virtud peso, fortaleza y área superficial.

de su posición en un campo eléctrico.

Espacio-tiempo. Continuo tetradimensional en el que tienen lugar Energía potencial gravitacional. Energía asociada a un campo gra- todos los eventos y existen todas las cosas; tres dimensiones son las vitacional, que sobre la Tierra resulta de la interacción gravitacio- coordenadas de espacio y la cuarta es de tiempo.

nal de un cuerpo y la Tierra. La energía potencial (EP) cerca de la

Espectro. Para la luz solar y otra luz blanca, la dispersión de colores superficie de la Tierra es igual a la masa (m) por la aceleración de- vistos cuando la luz pasa a través de un prisma o rejilla de di-

bida a la gravedad (g) por la altura (h) desde un nivel de referencia fracción. Los colores del espectro, en orden de menor frecuencia

como la superficie de la Tierra.

(longitud de onda más larga) a mayor frecuencia (longitud de onda

EP mgh

más corta), son: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo,

Energía punto cero. Cantidad extremadamente pequeña de energía violeta. Véanse también espectro de absorción, espectro electromagné-cinética que las moléculas o átomos tienen incluso en cero abso-

tico, espectro de emisión y prisma.

luto.

Espectro de absorción. Espectro continuo, como el generado por la Energía radiante. Cualquier energía, incluidos calor, luz y rayos X, luz blanca, interrumpido por líneas o bandas oscuras que resultan

que se transmite por radiación; ocurre en la forma de ondas elec-

de la absorción de luz de ciertas frecuencias por una sustancia a

tromagnéticas.

través de la cual pasa la luz.

Enlace atómico. Unión de átomos para formar estructuras más gran-
Espectro de emisión. Distribución de longitudes de onda en la luz
des, como moléculas y sólidos.

proveniente de una fuente luminosa.

Espectro de líneas. Patrón de distintas líneas de color, correspon-
Flotabilidad. Pérdida aparente de peso de un objeto inmerso o su-
dientes a frecuencias particulares de luz, que se ven en un espec-

mergido en un fluido.

troscopio cuando se observa un gas caliente. Cada elemento tiene

Flotación. Véase principio de flotación.

un patrón de líneas único.

Fluido. Cualquier cosa que fluye; en particular, cualquier líquido,
gas Espectro electromagnético. Rango de frecuencias sobre el cual
pue-o plasma.

de propagarse la radiación electromagnética. Las frecuencias más

bajas se asocian a las ondas de radio; las microondas tienen una

Fluorescencia. Propiedad de ciertas sustancias de absorber radiación
frecuencia más alta, y luego están en secuencia las ondas infrarro-de
una frecuencia y volver a emitir radiación de una frecuencia

jas, la luz, la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma.

más baja.

Espectro visible. Véase espectro electromagnético.

FM. Abreviatura de frecuencia modulada.

Espectrómetro. Véase espectroscopio.

Foco. (a) Para una elipse, uno de los dos puntos para los cuales la

suma de las distancias hacia cualquier punto sobre la elipse es una

Espectrómetro de masas. Dispositivo que separa magnéticamente constante. Un satélite que orbita la Tierra se mueve en una elipse

iones cargados de acuerdo con su masa.

que tiene un foco en el centro de la Tierra. (b) Para óptica, un

Espectroscopio. Instrumento óptico que separa la luz en sus frecuen-punto focal.

cias o longitudes de onda constituyentes en la forma de líneas es-

Fórmula química. Descripción en la que se usan números y símbolos pectrales. Un espectrómetro es un instrumento que también puede de elementos para describir las proporciones de los elementos en

medir las frecuencias o longitudes de onda.

un compuesto o reacción.

Espejismo. Falsa imagen que aparece en la distancia y se debe a la Fosforescencia. Tipo de emisión de luz que es igual a la fluorescen-refracción de la luz en la atmósfera de la Tierra.

cia, excepto por una demora entre la excitación y la desexcitación,

Espejo cóncavo. Espejo que se curva hacia adentro como una "cue-lo que proporciona un brillo posterior que puede durar desde

va". Véase también espejo convexo.

fracciones de segundo hasta horas, o incluso días, dependiendo de

Espejo convexo. Espejo que se curva hacia afuera. La imagen virtual factores como el tipo de material y la temperatura.

formada es más pequeña y está más cerca del espejo que el objeto.

Fósforo. Material en polvo, como el que se utiliza en la superficie Véase también espejo cóncavo.

interior de un tubo de luz fluorescente, que absorbe fotones ultra-

Espejo plano. Espejo con una superficie plana.

violeta y luego suministra luz visible.

Estado metaestable. Estado de excitación de un átomo que se carac-
Fotón. Luz que se manifiesta como una partícula; como un cor-

teriza por una prolongada demora antes de la desexcitación.

púsculo de luz.

Estampido sónico. Fuerte sonido que resulta de la incidencia de una
Fóvea. Área de la retina que está en el centro del campo de visión;
onda de choque.

región de visión más nítida.

Estrella de neutrones. Estrella que experimentó un colapso gravita-
Frecuencia. Para un cuerpo o medio en vibración, número de
vibracional en el cual los electrones se comprimieron hacia los
protones

ciones por unidad de tiempo. Para una onda, el número de crestas

para formar neutrones.

que pasan un punto particular por unidad de tiempo. La frecuen-

Éter. Medio hipotético invisible que antes se creía que era necesario
cia se mide en hertz.

para la propagación de las ondas electromagnéticas y se pensaba

Frecuencia fundamental. Véase tono parcial.

que llenaba el espacio de todo el Universo.

Frecuencia modulada (FM). Tipo de modulación en el cual la fre-
eV. Abreviatura para electrón-volt.

cuencia de una onda portadora varía por arriba y por debajo de

Evaporación. Cambio de fase de líquido a gas que tiene lugar en la
su frecuencia normal por una cantidad que es proporcional a la

superficie de un líquido; lo opuesto a la condensación.

amplitud de la señal impresa. En este caso, la amplitud de la onda

Excitación. Proceso de impulsar uno o más electrones en un átomo o molécula de un nivel de energía más bajo a uno más alto. Un átomo rápido hacia un estado más bajo por la emisión de radiación. La

Frecuencia natural. Frecuencia a la que tiende a vibrar un objeto en un estado excitado por lo general decaerá (se desexcitará) más elástico si se perturba y luego se retira la fuerza perturbadora.

Frente de onda. Cresta, valle o cualquier porción continua de una onda bi- o tridimensional en la que las vibraciones son todas igua-

E 5 hf

les al mismo tiempo.

Fase. (a) Una de las cuatro principales formas de materia: sólido, líquido, gas y plasma; generalmente se le denomina estado. (b) La parte de un ciclo que ha avanzado una onda (o la Luna) en cualquier momento. Véase también en fase y fuera de fase.

Fricción. Fuerza que actúa para resistir el movimiento relativo (o intento de movimiento) de los objetos o materiales que están en contacto.

Fricción estática. Fuerza entre dos objetos que están en reposo relativo en virtud del contacto que tiende a oponerse al deslizamiento.

Fibra óptica. Fibra transparente, por lo general de vidrio o plástico, que puede transmitir luz por todo su largo mediante reflexión interna total.

Fuente de voltaje. Dispositivo, como una pila seca, batería, generador o celda solar, que proporcionan una diferencia de potencial.

fem. Abreviatura de fuerza electromotriz.

Fuera de fase. Término aplicado a dos ondas para las cuales la

cresta Física cuántica. Rama de la física que es el estudio general del micro-de una onda coincide con un valle de la segunda onda. Sus efectos

mundo de los fotones, átomos y núcleos.

tienden a cancelarse mutuamente.

Fisión nuclear. División de un núcleo atómico, en particular el de Fuerza. Cualquier empuje o tirón ejercido sobre un objeto; una can- un elemento pesado como el uranio-235, en dos elementos más

tidad vectorial que se mide en newtons. La fuerza no equilibrada

ligeros, acompañada de la liberación de mucha energía.

cambia el movimiento de un objeto.

Fuerza centrífuga. Fuerza aparente hacia afuera sobre un cuerpo en símbolo del vector del campo gravitacional (en la superficie de la

rotación o que gira.

Tierra, 9.8 N/kg hacia abajo). (d) Cuando es G mayúscula cursi- Fuerza centrípeta. Fuerza dirigida hacia el centro que hace que un va, símbolo de la constante gravitacional universal (6.67 3 10211

objeto siga una trayectoria curva o circular.

N • m2/kg2).

Fuerza de acción. Una del par de fuerzas descrito en la tercera ley Galvanómetro. Instrumento utilizado para detectar corriente eléctri- de Newton. Véanse también leyes de movimiento de Newton, Ley 3.

ca. Con la combinación adecuada de resistores, puede convertirse

Fuerza de flotación. Fuerza ascendente neta ejercida por un fluido en un amperímetro o un voltímetro. Un amperímetro se calibra

sobre un objeto sumergido o en inmersión.

para medir corriente eléctrica; un voltímetro se calibra para medir

potencial eléctrico.

Fuerza de reacción. Fuerza que es igual en intensidad y opuesta en dirección a la fuerza de acción, y una que actúa en forma simultá-

Gas. Fase de la materia distinta de la fase líquida que no tiene forma

nea sobre cualquier cosa que ejerza la fuerza de acción. Véase tam-

definida porque sus moléculas se mueven libremente y llenan cual-

bién leyes de movimiento de Newton, Ley 3.

quier espacio que esté disponible.

Fuerza de sostén. Fuerza ascendente que equilibra el peso de un ob-

Generador. Máquina que produce corriente eléctrica, por lo general

jeto sobre una superficie.

mediante una bobina giratoria en el interior de un campo magné-

tico estacionario.

Fuerza débil. También llamada interacción débil, la fuerza dentro de un núcleo que se encarga de la emisión beta (electrón).

Generador magnetohidrodinámico (MHD). Dispositivo que gene-

ra electricidad por la interacción de un plasma y un campo mag-

Fuerza eléctrica. Fuerza que una carga ejerce sobre otra. Cuando

nético.

las cargas son del mismo signo, se repelen; cuando las cargas son

opuestas, se atraen.

Geodésica. Trayectoria más corta entre puntos sobre cualquier superficie.

Fuerza electromotriz (fem). No es una fuerza, sino cualquier voltaje que origina una corriente eléctrica. Una batería o un generador es

Gramo (g). Una unidad métrica de masa; un milésimo de kilogramo.

una fuente de fem.

Gravitación. Atracción entre objetos debido a la masa. Véanse tam-

Fuerza fuerte. Se conoce así a la fuerza que atrae los nucleones entre

bién ley de gravitación universal y constante gravitacional universal.

ellos dentro del núcleo; una fuerza que es muy fuerte a distancias

Gravitón. Cuanto de gravedad, similar en concepto al fotón como cercanas pero disminuye rápido a medida que aumenta la distan-un cuanto de luz (no detectado al momento de este escrito).

cia. También se le llama interacción fuerte.

Grupo. Elementos en la misma columna de la tabla periódica.

Fuerza magnética. (a) Entre imanes, es la atracción mutua de polos h. (a) Abreviatura de hora (aunque con frecuencia se usa hr).

magnéticos distintos y la repulsión entre polos magnéticos iguales.

(b) Cuando es h cursiva, símbolo de la constante de Planck.

(b) Entre un campo magnético y una partícula cargada en mo-

vimiento, es una fuerza de deflexión debida al movimiento de la

Hadrón. Partícula elemental que puede participar en interacciones partícula: la fuerza de deflexión es perpendicular a las líneas del

de fuerza nuclear fuerte.

campo magnético y la dirección del movimiento. Esta fuerza es

Hecho. Algo sobre lo que coinciden muy de cerca observadores com-mayor cuando la partícula cargada se mueve perpendicular a las

petentes de un evento o una serie de observaciones de los mismos

líneas de campo y es más pequeña (cero) cuando se mueve paralela

fenómenos.

a las líneas de campo.

Hertz (Hz). Unidad del SI de frecuencia. Un hertz es una vibración Fuerza neta. Combinación de todas las fuerzas que actúan sobre por segundo.

un objeto.

Hipótesis. Conjetura informada; explicación razonable de una ob-Fuerza normal. Componente de la fuerza de soporte que es perpen-

servación o resultado experimental que no es plenamente aceptado

dicular a una superficie de soporte. En el caso de un objeto que

como factual hasta que se pone a prueba una y otra vez con expe-

descansa sobre una superficie horizontal, es la fuerza ascendente

rimentos.

que equilibra el peso del objeto.

Holograma. Patrón de interferencia microscópico bidimensional
Fulcro. Punto pivote de una palanca.

que muestra imágenes ópticas tridimensionales.

Fusible. Dispositivo en un circuito eléctrico que rompe el circuito
Humedad. Medida de la cantidad de vapor de agua en el aire. La hu-
cuando la corriente es tan alta como para provocar un incendio.

medad absoluta es la masa de agua por volumen de aire. La hume-

Fusión. Cambio de fase de sólido a líquido; lo opuesto de la congela-
dad relativa es la humedad absoluta a dicha temperatura dividida

ción. La fusión es un proceso diferente de la disolución, en la cual

entre el máximo posible, por lo general dado como porcentaje.

un sólido agregado se mezcla con un líquido y el sólido se disocia.

Humedad relativa. Razón entre la cantidad de vapor de agua que hay Fusión nuclear. Combinación de núcleos de átomos ligeros, como el en el aire y la máxima cantidad de vapor de agua que podría haber en

hidrógeno, en núcleos más pesados, con frecuencia con la libera-

el aire a la misma temperatura, expresada como porcentaje.

ción de mucha energía. Véase también fusión termonuclear.

Hz. Abreviatura de hertz.

Fusión termonuclear. Fusión nuclear generada por temperaturas ex-Imagen real. Imagen formada por rayos de luz que convergen en la tremadamente altas; en otras palabras, la "soldadura" de núcleos

posición de la imagen. Una imagen real, a diferencia de una ima-

atómicos mediante una alta temperatura.

gen virtual, puede mostrarse sobre una pantalla.

g. (a) Abreviatura de gramo. (b) Cuando es g minúscula cursiva, sím-Imagen virtual. Imagen formada por rayos de luz que no convergen bolo de la aceleración debida a la gravedad (en la superficie de la

en la posición de la imagen. Los espejos, las lentes convergentes

Tierra, 9.8 m/s2 hacia abajo). (c) Cuando es g minúscula negrilla, que se usan como lupas y las lentes divergentes producen imágenes

virtuales. La imagen puede verla un observador mas no puede pro-

Intensidad. Potencia por metro cuadrado transportada por una onda yectarse sobre una pantalla.

sonora; con frecuencia se mide en decibeles.

Imán. Cualquier objeto que tenga propiedades magnéticas, esto es, Interacción. Acción mutua entre objetos, donde cada objeto ejerce la capacidad de atraer objetos hechos de hierro u otras sustancias

una fuerza igual y opuesta sobre el otro.

magnéticas. Véanse también electromagnetismo y fuerza magnética.

Interacción débil. Véase fuerza débil.

Impulso. Producto de la fuerza y el intervalo de tiempo durante el Interacción fuerte. Véase fuerza fuerte.

cual actúa la fuerza. El impulso produce un cambio en la cantidad

de movimiento.

Interferencia. Resultado de superponer diferentes ondas, generalmente con la misma longitud de onda. La interferencia constructiva

Impulso Ft (mv)

resulta del reforzamiento cresta a cresta; la interferencia destruc -

Incandescencia. Estado de brillo a alta temperatura, causado por los tiva resulta de la cancelación cresta a valle. La interferencia de lon- electrones que rebotan a través de dimensiones mayores que el ta-

gitudes de onda seleccionadas produce colores conocidos como

maño de un átomo y emiten energía radiante en el proceso. La

colores de interferencia. Véanse también interferencia constructiva, frecuencia pico de la energía radiante es proporcional a la tempera- interferencia destructiva, patrón de interferencia y onda estacionaria.

tura absoluta de la sustancia calentada:

Interferencia constructiva. Combinación de ondas de modo que f □ T

dos o más ondas se traslapan para producir una onda resultante de

Índice de refracción (n). Razón de la rapidez de la luz en el vacío con amplitud aumentada. Véase también interferencia.

respecto a la rapidez de la luz en otro material.

Interferencia destructiva. Combinación de ondas de modo que las rapidez de la luz en el vacío

crestas de una onda se traslapan con los valles de otra, lo que da

n = rapidez de la luz en material

por resultado una onda de amplitud reducida. Véase también in-

terferencia.

Inducción. Carga de un objeto sin contacto directo. Véanse también inducción electrostática e inducción electromagnética.

Interferómetro. Dispositivo que usa la interferencia de ondas luminosas para medir distancias muy pequeñas con gran exactitud.

Inducción electromagnética. Fenómeno de producir un voltaje en Michelson y Morley usaron un interferómetro en sus famosos ex-un conductor al cambiar el campo magnético cerca del conduc-

perimentos con luz.

tor. Si el campo magnético en el interior de una espira cerrada

cambia de alguna forma, se induce un voltaje en la espira. La in-

Inversamente. Cuando dos valores cambian en direcciones opuestas ducción de voltaje es, en realidad, resultado de un fenómeno más

–de modo que si una aumenta, la otra disminuye por el mismo

fundamental: la inducción de un campo eléctrico. Véase también

factor– se dice que son inversamente proporcionales uno a otro.

ley de Faraday.

Inversión de temperatura. Condición en la cual se detiene la con-
Inducción electrostática. Cargar un objeto o hacer que una carga se
vección ascendente del aire, en ocasiones porque una región supe-
mueva en el interior de un objeto sin contacto directo.

rior de la atmósfera es más caliente que la región bajo ella.

Inducido. (a) Término aplicado a la carga eléctrica que se redistribu-
Inversión del polo magnético. Cuando el campo magnético de un yó
sobre un objeto debido a la presencia de un objeto cargado cer-
cuerpo astronómico invierte sus polos; esto es, el polo magnético

cano. (b) Término aplicado a un voltaje, campo eléctrico o campo

norte se convierte en el polo magnético sur, y el polo magnético sur

magnético que se crea debido a un cambio o movimiento a través

se convierte en el polo magnético norte.

de un campo magnético o un campo eléctrico.

Ion. Átomo (o grupo de átomos enlazados) con una carga eléctrica
Inelástico. Término aplicado a un material que no regresa a su
forma neta que se debe a la pérdida o ganancia de electrones. Un ión

original después de estirarse o comprimirse.

positivo tiene una carga positiva neta; un ión negativo tiene una

carga negativa neta.

Inercia. Imperturbabilidad o resistencia aparente de un objeto para
cambiar su estado de movimiento. La masa es la medida de la
inercia.

Ionización. Proceso de agregar o quitar electrones al núcleo atómico.

Inercia rotacional. Renuencia o aparente resistencia de un objeto a
Iridiscencia. Fenómeno en el cual la interferencia de ondas lumino-
cambiar su estado de rotación, determinado por la distribución de

sas de frecuencias mezcladas reflejadas de las partes superior e infe-
la masa del objeto y la ubicación del eje de rotación o revolución.

rior de películas delgadas produce una gama de colores.

Infrarrojas. Ondas electromagnéticas con frecuencias menores que el rojo de la luz visible.

pasa la luz. El iris regula la cantidad de luz que entra en el ojo.

Infrasónico. Término aplicado a las frecuencias sonoras por debajo de 20 Hz, el límite inferior normal de audición humana.

nes pero diferente número de neutrones.

Ingeniería. Tecnología dirigida al diseño, construcción y mantenimiento de obras, maquinaria, caminos, vías férreas, puentes, motores, todo tipo de vehículos desde microcarros hasta estaciones espaciales, y a la generación, transmisión y uso de energía eléctrica. Algunas de sus principales divisiones son: aeroespacial, química, civil, de comunicaciones, eléctrica, electrónica, de materiales, mecánica, de minas y estructural.

Isótopos. Átomos cuyos núcleos tienen el mismo número de proto-

Iris. Parte coloreada del ojo que rodea la abertura negra por la cual

J. Abreviatura de joule.

Joule (J). Unidad del SI de trabajo y de todas las demás formas de energía. Un joule de trabajo se realiza cuando una fuerza de 1 newton se ejerce sobre un objeto que se mueve 1 metro en la dirección de la fuerza.

K. (a) Abreviatura de kelvin. (b) Cuando es k minúscula, la abreviatura del prefijo kilo-. (c) Cuando es k minúscula cursiva, símbolo de la constante de proporcionalidad eléctrica en la ley de Coulomb (alrededor de 9 109 N • m2/C2). (d) Cuando es k minúscula cursiva, símbolo de la constante de resorte en la ley de Hooke.

Ingravidez. Condición en la que un objeto no experimenta fuerza de sostén (y no ejerce fuerza sobre una báscula), como cuando está en caída libre o en órbita.

Kelvin. Unidad del SI de temperatura. Una temperatura medida en el cuadrado de la distancia entre ellas (k es la constante de proporcio- kelvins (símbolo K) indica el número de unidades arriba del cero

nalidad 9 109 N • m2/C2). Si las cargas son de igual signo, la fuerza absoluto. Las divisiones en las escalas Kelvin y Celsius son del mis-es de repulsión; si las cargas son diferentes, la fuerza es de atracción.

mo tamaño, de modo que un cambio de temperatura de 1 kelvin

$q\ 1\ q\ 2$

es igual a un cambio de temperatura de 1 grado Celsius.

$F = k\ d\ 2$

kilo. Prefijo que significa mil, como en kilowatt o kilogramo.

Ley de Faraday. El voltaje inducido en una bobina es proporcional al Kilocaloría (kcal). Unidad de calor. Una kilocaloría es igual a 1,000 ca-producto de su número de espiras, el área transversal de cada espira

lorías, o la cantidad de calor necesario para aumentar en 1C la tem-

y la tasa a la que cambia el campo magnético dentro de dichas es-

peratura de 1 kilogramo de agua; es igual a una Caloría alimenticia.

piras. En general, un campo eléctrico se induce en cualquier región

Kilogramo (kg). Unidad de masa fundamental del SI; es igual a del espacio donde un campo magnético cambia con el tiempo. La

1,000 gramos. Un kilogramo es casi la cantidad de masa en 1 litro

magnitud del campo eléctrico inducido es proporcional a la tasa a

de agua a 4C.

la que cambia el campo magnético. Véase también contraparte de

Maxwell a la ley de Faraday.

Kilómetro (km). 1,000 metros.

cambio en campo magnético

Kilowatt (kW). 1,000 watts.

Voltaje inducido □ número de espiras ×

cambio en el tiempo

Kilowatt-hora (kWh). Cantidad de energía consumida en 1 hora a la tasa de 1 kilowatt.

Ley de gravitación universal. Para cualquier par de objetos, cada partícula atrae al otro objeto con una fuerza que es directamente

km. Abreviatura de kilómetro.

proporcional al producto de sus masas, e inversamente proporcio-

kPa. Abreviatura de kilopascal. Véase pascal.

nal al cuadrado de la distancia entre sus centros de masa, donde F

kWh. Abreviatura de kilowatt-hora.

es la fuerza, m es la masa, d es la distancia y G es la constante de L. Abreviatura de litro; en algunos libros de texto se usa la l minúscula.

gravitación universal:

Lámpara fluorescente compacta (CFL). Versión miniatura de una m
m

1

2

m m

F □

1

2

2

o F = G

lámpara fluorescente, por lo general con forma de espiral.

d

d 2

Láser. Instrumento óptico que produce un haz de luz coherente; esto
Ley de Hooke. La distancia de estiramiento u opresión (extensión o
es: luz en la cual todas las ondas tienen la misma frecuencia, fase

compresión) de un material elástico es directamente proporcional

y dirección. La palabra es un acrónimo de light amplification by a la
fuerza aplicada. Donde x es el cambio de longitud y k es la

stimulated emission of radiation: amplificación de luz mediante
constante de resorte,

emisión estimulada de radiación.

F k x

Lente. Pieza de vidrio u otro material transparente que puede llevar
Ley de inercia. Véase leyes de Newton de movimiento, Ley 1.

luz a un foco.

Ley de Newton de enfriamiento. La tasa de enfriamiento de un ob-
Lente convergente. Lente que es más gruesa en medio que en los jeto (ya sea por conducción, convección o radiación) es aproxi-bordes y
refracta rayos paralelos de luz que pasan a través de ésta

madamente proporcional a la diferencia de temperatura entre el

hacia un foco. Véase también lente divergente.

objeto y sus alrededores.

Lente divergente. Lente más delgado en medio que en los bordes, lo
Ley de Ohm. La corriente en un circuito es directamente propor-que
hace que los rayos paralelos de luz que lo atraviesan diverjan

cional al voltaje aplicado a través del circuito y es inversamente

como si provinieran de un punto. Véase también lente convergente.

proporcional a la resistencia del circuito.

Lentes acromáticos. Véase aberración cromática.

voltaje

Corriente =

Leptón. Clase de partículas elementales que no están involucradas resistencia

con la fuerza nuclear fuerte. Incluye al electrón y su neutrino, el

Ley de reflexión. El ángulo de incidencia para una onda que golpea muon y su neutrino, y el tau y su neutrino.

una superficie es igual al ángulo de reflexión. El rayo incidente,

Ley. Hipótesis o enunciado general acerca de la relación de cantida- el rayo reflejado y la normal respecto de la superficie están todos

des naturales que se pusieron a prueba una y otra vez y no se han

en el mismo plano. Esto es válido para ondas que se reflejan tanto

contradicho; también conocida como principio.

parcial como totalmente. Véanse también ángulo de incidencia y Ley de Boyle. El producto de presión y volumen es una constante ángulo de reflexión.

para una masa dada de gas confinado, sin importar los cambios de

Ley del inverso al cuadrado. Ley que relaciona la intensidad de un presión o volumen por separado, siempre y cuando la temperatura

efecto con el inverso al cuadrado de la distancia desde la causa.

permanezca invariable.

Los fenómenos gravitacionales, eléctricos, magnéticos, luminosos,

P

sonoros y de radiación siguen la ley del inverso al cuadrado.

1 V 1 P 2 V 2

Ley de conservación de la cantidad de movimiento. En ausencia de 1

Intensidad □

una fuerza externa, la cantidad de movimiento de un sistema per-

distancia2

manece invariable. Por tanto, la cantidad de movimiento antes de

Leyes de Kepler. Ley 1: La trayectoria de cada planeta alrededor del un evento que sólo implica fuerzas internas es igual a la cantidad

Sol es una elipse con el Sol en un foco.

de movimiento después del evento:

Ley 2: La línea que va del Sol a cualquier planeta barre áreas iguales mv(antes de evento) mv(después de evento) de espacio en intervalos de tiempo iguales.

Ley de Coulomb. Enunciado sobre la relación entre la fuerza eléctrica, Ley 3: El cuadrado del periodo orbital de un planeta es directa-las cargas y la distancia: la fuerza eléctrica entre dos cargas varía di-mente proporcional al cubo de la distancia promedio del planeta

rectamente como el producto de las cargas (q) e inversamente como respecto del Sol (T 2 ~ r 3 para todos los planetas).

GLOSARIO

G-11

Leyes de Newton de movimiento. Ley 1: Todo objeto continúa en trada y mueve calor "cuesta arriba" desde un lugar más frío hasta

un estado de reposo, o de rapidez uniforme en línea recta, a menos

uno más caliente.

que sobre él actúe una fuerza neta distinta de cero; también cono-

Marco de referencia. Sitio (por lo general un conjunto de ejes coor-cida como ley de inercia.

denados) con respecto al cual pueden describirse la posición y el

Ley 2: La aceleración producida por una fuerza neta sobre un ob-movimiento.

jeto es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza neta,

está en la misma dirección que la fuerza neta y es inversamente

Marco de referencia inercial. Sitio que no sufre aceleración y donde proporcional a la masa del objeto.

se sostienen con exactitud las leyes de Newton.

Ley 3: Siempre que un objeto ejerce una fuerza sobre un segundo
Marea muerta o de cuadratura. Marea que ocurre cuando la Luna objeto, el segundo objeto ejerce una fuerza igual y opuesta sobre el

está a medio camino entre una Luna nueva y una Luna llena, en

primero.

cualquier dirección. Las mareas debidas al Sol y la Luna se cancelan

Límite elástico. Distancia de estiramiento o compresión más allá de
de manera parcial, de modo que las mareas altas son más bajas que

la cual un material elástico no regresará a su estado original.

el promedio y las mareas bajas no son tan bajas como el promedio.

Véase también marea viva o de sicigia.

Línea de corriente. Trayectoria suave de una pequeña región de fluido en un flujo estacionario.

Marea viva o de sicigia. Marea alta o baja que ocurre cuando el Sol, la Tierra y la Luna se alinean de modo que coinciden las mareas

Líneas de absorción. Líneas oscuras que aparecen en un espectro de
debidas al Sol y la Luna, lo que hace que las mareas altas sean más

absorción. El patrón de líneas es único para cada elemento.

altas que el promedio y las mareas bajas sean más bajas que el pro-

Líneas de campo magnético. Líneas que muestran la forma de un medio. Véase también marea muerta o de cuadratura.

campo magnético. Una brújula colocada en tal línea girará de

Masa (m). Cantidad de materia en un objeto; la medición de la iner-

modo que la aguja se alinee con ella.

cia o resistencia que muestra un objeto en respuesta a cualquier

Líneas de Fraunhofer. Líneas oscuras visibles en el espectro del Sol esfuerzo realizado para arrancarlo, detenerlo o cambiar de alguna

o una estrella.

manera su estado de movimiento; una forma de energía.

Líneas espectrales. Líneas de color que se forman cuando la luz pasa Masa atómica. En la tabla periódica, la masa atómica es la masa por una rendija y luego a través de un prisma o rejilla de difrac -

promedio de los átomos de un elemento, calculada a partir de la

ción, por lo general en un espectroscopio. El patrón de líneas es

abundancia relativa de isótopos en un elemento que se presenta de

único para cada elemento.

manera natural.

Líquida. Fase de la materia entre las fases sólida y gaseosa en la que Masa crítica. Masa mínima de material fisionable en un reactor nu- la materia posee un volumen definido mas no una forma definida:

clear o bomba nuclear que sostendrá una reacción en cadena. Una

adopta la forma de su contenedor.

masa subcrítica es aquella en la que la reacción en cadena desapare-

Litro (L). Unidad métrica de volumen; igual a 1,000 cm3.

ce. Una masa supercrítica es aquella en la que la reacción en cadena

Longitud de onda. Distancia entre crestas, valles o partes idénticas se acumula de manera explosiva.

sucesivas de una onda.

Masa subcrítica. Véase masa crítica.

Longitud focal. Distancia entre el centro de una lente y cualquier Masa supercrítica. Véase masa crítica.

punto focal; como la distancia entre un espejo y su punto focal.

Máser. Instrumento que produce un haz coherente de microondas.

Luces del norte. Véase aurora boreal.

La palabra es un acrónimo de microwave amplification by stimulated emission of radiation:

Luz. Parte visible del espectro electromagnético.

amplificación de microondas mediante

emisión estimulada de radiación.

Luz blanca. Luz, como la luz solar, que es una combinación de todos los colores. Bajo la luz blanca, los objetos blancos se ven

Materia oscura. Materia no vista y no identificada que es evidente blan cos y los objetos de color se ven en sus colores individuales.

por su tirón gravitacional sobre las estrellas en las galaxias.

Mecánica cuántica.

Luz coherente. Luz de una sola frecuencia con todos los fotones exac-Rama de la física que se ocupa del micromundo

tamente en fase y con movimiento en la misma dirección. Los láse-

atómico con base en funciones de onda y probabilidades, introdu-

res producen luz coherente. Véanse también luz incoherente y láser.

cida por Max Planck (1900) y desarrollada por Werner Heisenberg

(1925), Erwin Schrödinger (1926) y otros.

Luz incoherente. Luz que contiene ondas con un conglomerado de frecuencias, fases y posiblemente direcciones. Véanse también luz mega- Prefijo que significa millón, como en megahertz o megajoule.

coherente y láser.

Mesón. Partícula elemental con un número de masa cero; puede par- Luz monocromática. Luz constituida con un solo color y, por tanto, ticipar en la interacción nuclear fuerte.

ondas de una sola longitud de onda y frecuencia.

Método científico. Método ordenado para adquirir, organizar y apli-
Luz visible. Parte del espectro electromagnético que puede ver el ojo
car nuevo conocimiento.

humano.

Metro (m). Unidad de longitud estándar del SI (3.28 pies).

m. Abreviatura de metro.

MeV. Abreviatura de millón de electrón-volts, una unidad de energía
Magnetismo. Fenómenos asociados a los campos magnéticos. Véanse
o, de manera equivalente, una unidad de masa.

también electromagnetismo y fuerza magnética.

Mezcla. Las sustancias se mezclan sin combinarse químicamente.

Máquina. Dispositivo que aumenta (o disminuye) una fuerza o sim-
MHD. Abreviatura de magnetohidrodinámica.

plemente cambia la dirección de una fuerza.

mi. Abreviatura de milla.

Máquina térmica. Dispositivo que usa calor como entrada y sumi-
Microondas. Ondas electromagnéticas que tienen frecuencias mayo-
nistra trabajo mecánico como salida, o que usa trabajo como en-

res que las ondas de radio, pero menores que las ondas infrarrojas.

Microscopio. Instrumento óptico que forma imágenes agrandadas
Núcleo. Centro con carga positiva de un átomo, que contiene pro-de
objetos muy pequeños.

tones y neutrones y tiene casi la totalidad de la masa de todo el

min. Abreviatura de minuto.

átomo, pero sólo una pequeña fracción del volumen.

MJ. Abreviatura de megajoules, 1 millón de joules.

Nucleón. Principal componente del núcleo; un neutrón o un protón;
Modelo. Representación de una idea creada para hacer la idea más
nombre colectivo para alguno de ellos o ambos.

comprensible.

Número atómico. Número asociado a los átomos de un elemento

Modelo de capas del átomo. Modelo en el cual los electrones de
dado, igual al número de protones en el núcleo o, de manera equi-un
átomo se representan como agrupados en capas concéntricas

valente, al número de electrones en la nube de electrones de un

alrededor del núcleo.

átomo neutro.

Número de Avogadro.

Modulación. Imprimir un sistema de ondas de señal en una onda
6.02 3 1023 moléculas.

portadora de mayor frecuencia; amplitud modulada (AM) para

Número de masa. Véase masa atómica.

señales de amplitud y frecuencia modulada (FM) para señales de

Número de masa atómica. Número asociado a un átomo, igual al
frecuencia.

número de nucleones (protones más neutrones) en el núcleo.

Molécula. Dos o más átomos del mismo o diferentes elementos enla-
Número Mach. Razón de la rapidez de un objeto con respecto a la
zados para formar una partícula más grande.

rapidez del sonido. Por ejemplo, un avión que viaja a la rapidez
Momento de torsión. Producto de la fuerza y la distancia de brazo de
del sonido se clasifica Mach 1.0; si viaja al doble de la rapidez del
palanca, que tiende a producir una aceleración rotacional.

sonido, Mach 2.0.

Momento de torsión = distancia brazo de palanca 3 fuerza Objetivo.
En un dispositivo óptico que usa lentes compuestos, el lente más

cercano al objeto observado.

Monopolo magnético. Partícula hipotética que tiene un solo polo magnético norte o sur, análoga a una carga eléctrica positiva o ne-
Octava. En música, el octavo tono completo arriba o abajo de un gativa.

tono dado. El tono que está una octava arriba tiene el doble de

vibraciones por segundo que el tono original; el tono que está una

Movimiento armónico simple. Movimiento vibratorio o periódico, como el de un péndulo, en el que la fuerza que actúa sobre el cuer-
octava abajo tiene la mitad de las vibraciones por segundo.

po en vibración es proporcional a su desplazamiento de su posición

Ocular. Lente de un telescopio que está más cerca del ojo; amplifica de equilibrio central y actúa hacia dicha posición.

la imagen real formada por el primer lente.

Movimiento browniano. Movimiento azaroso de pequeñas partícu-
Ohm (W). Unidad del SI de resistencia eléctrica. Un ohm es la relas suspendidas en un gas o en un líquido que resulta de colisiones

sistencia de un dispositivo que extrae una corriente de 1 ampere

con las moléculas de movimiento rápido del gas o líquido.

cuando a través de él se aplica un voltaje de 1 volt.

Movimiento lineal. Movimiento en línea recta, a diferencia del mo-
Onda. Un "contoneo en espacio y tiempo"; una perturbación que vimiento circular, angular o rotacional.

se repite con regularidad en un medio o un campo que transpor-

ta energía de un lugar al siguiente sin ningún transporte neto de

Movimiento oscilatorio. Repetición del movimiento vibratorio de ida y vuelta, como el de un péndulo.

materia.

Onda de choque. Onda con forma de cono producida por un objeto
Muon. Partícula elemental de la familia de los leptones.

que se mueve a rapidez supersónica a través de un fluido.

Música. En términos científicos, sonido asociado a tonos periódicos
Onda de proa.

y regularidad.

Onda con forma de V producida por un objeto que

se mueve sobre una superficie líquida más rápido que la rapidez

N. Abreviatura de newton.

de la onda.

Nanómetro. Unidad métrica de longitud que es 1029 metro (un mil
Onda electromagnética. Onda portadora de energía emitida por

millonésimo de metro).

cargas en vibración (a menudo electrones) que se compone de

Neutrino. Partícula elemental en la clase de las partículas
elementales campos eléctrico y magnético en oscilación que se
regeneran entre

llamadas leptones. No tiene carga y casi no tiene masa; tres tipos

sí. Ondas de radio, microondas, radiación infrarroja, luz visible,

—el electrón, el muon y los neutrinos tau— son las partículas de

radiación ultravioleta, rayos X y rayos gamma son todas ondas

alta rapidez más comunes en el Universo; cada segundo más de mil

electromagnéticas.

millones atraviesan sin obstáculos a cada persona.

Onda estacionaria. Patrón de onda estacionaria formado en un me-
Neutrón. Partícula eléctricamente neutra que es uno de los dos tipos
dio cuando dos conjuntos de ondas idénticas pasan a través del

de nucleones que componen un núcleo atómico.

medio en direcciones opuestas. La onda parece no viajar. El resul-

Newton (N). Unidad de fuerza del SI. Un newton es la fuerza aplicada a 1 kilogramo masa que producirá una aceleración de 1 metro por segundo por segundo.

Onda gravitacional. Perturbación gravitacional que se propaga a través del espacio-tiempo producida por una masa en movimiento (no detectada al momento de este escrito).

Nodo. Cualquier parte de una onda estacionaria que permanece estacionaria; una región de energía mínima o cero.

Onda longitudinal. Onda en la que cada una de las partículas de un medio vibran de ida y vuelta en la dirección (paralela) en la que viaja la onda, por ejemplo, el sonido.

Normal. En ángulos rectos a, o perpendicular a. Una fuerza normal actúa en ángulos rectos respecto de la superficie sobre la que actúa. En óptica, una normal define la línea perpendicular a una superficie sobre la cual se miden los ángulos de los rayos de luz.

Onda plana polarizada. Onda transversal confinada a un solo plano de vibración.

Onda portadora. Onda de radio de alta frecuencia modificada por una onda de frecuencia más baja.

Penumbra. Región de una sombra parcialmente iluminada donde se bloquea parte, mas no toda, la luz proveniente de una fuente. Véase también umbra.

Onda sinusoidal. La más simple de las ondas, que tiene una sola frecuencia y la forma de una curva seno.

Percusión. En instrumentos musicales, el golpeteo de un objeto con-
Onda transversal. Onda con vibración en ángulos rectos respecto de
tra otro.

la dirección en que viaja la onda. La luz consiste en ondas trans-

Perigeo. Punto en una órbita elíptica más cercano al foco en torno al
versales.

cual tiene lugar el orbitar. Véase también apogeo.

Ondas de calor. Véase ondas infrarrojas.

Periodo. En general, el tiempo necesario para completar un solo ci-
Ondas de materia. Véase ondas de materia de De Broglie.

clo. (a) Para un movimiento orbital, el tiempo necesario para reco-

rrer una órbita completa. (b) Para vibraciones u ondas, el tiempo

Ondas de materia de De Broglie. Todas las partículas tienen pro-
necesario para un ciclo completo, igual a 1/frecuencia.

piedades ondulatorias; en la ecuación de De Broglie, el producto

de la cantidad de movimiento y la longitud de onda es igual a la

Perturbación. Desviación de un objeto en órbita (por ejemplo, un
pla-constante de Planck.

neta) de su trayectoria alrededor de un centro de fuerza (por
ejemplo, el Sol) causada por la acción de otro centro de fuerza (por
ejem-Ondas de radio. Ondas electromagnéticas con la frecuencia
más larga.

plo, otro planeta).

Ondas infrarrojas. Ondas electromagnéticas que tienen una fre-Peso.
La fuerza que un objeto ejerce sobre una superficie de sostén (o,
cuencia menor que la luz roja visible.

si está suspendido, sobre una cuerda de soporte), con frecuencia,

Opaco. Término aplicado a los materiales que absorben luz sin
remas no siempre, debida a la fuerza de gravedad.

emisión o reflexión y, en consecuencia, no permiten luz a través

Pigmento. Partículas finas que selectivamente absorben luz de ciertas de ellos.

frecuencias y selectivamente transmiten y/o reflejan otras.

Órbita geosíncrona. Órbita de un satélite en la que el satélite orbita Plano focal. Plano, perpendicular al eje principal, que atraviesa un la Tierra una vez al día. Cuando se mueve hacia el oeste, el satélite punto focal de un lente o espejo. Para una lente convergente o

permanece en un punto fijo (aproximadamente a 36,000 km) so-

un espejo cóncavo, cualquier rayo de luz paralelo incidente con-

bre la superficie de la Tierra.

verge en un punto en alguna parte sobre un plano focal. Para una

Oscilación. Igual que la vibración: un movimiento repetitivo de ida lente divergente o un espejo convexo, los rayos parecen provenir de

y vuelta en torno a una posición de equilibrio. Tanto la oscilación

un punto sobre un plano focal.

como la vibración se refieren a un movimiento periódico, esto es,

Plasma. Cuarta fase de la materia, además de sólido, líquido y gas. En un movimiento que se repite de manera regular.

la fase de plasma, que existe principalmente a altas temperaturas, la Oxidación. Proceso químico en el que un elemento o molécula pier- materia consiste en iones con carga positiva y electrones libres.

de uno o más electrones.

Polarización. Alineamiento de vibraciones en una onda transversal, Ozono. Gas de moléculas de oxígeno compuesto de tres, en vez de por lo general mediante la filtración de las ondas que vibran en

los dos átomos de oxígeno usuales. El O3 se forma cuando la mo-

todos los planos excepto en uno. Véanse también onda plana pola-

lécula de oxígeno estable (O2) se divide mediante radiación UV o

rizada y cristal dicroico.

descarga eléctrica. Se encuentra de manera natural en una delgada

Polea. Rueda que actúa como una palanca utilizada para cambiar la capa en la atmósfera superior.

dirección de una fuerza. Una polea o sistema de poleas también

Pa. Abreviatura de la unidad pascal del SI.

puede multiplicar fuerzas.

Palanca. Máquina simple hecha de una barra que gira en torno a un Polo magnético. Una de las regiones en un imán que produce fuerzas punto fijo llamado fulcro.

magnéticas.

Parábola. Trayectoria curva seguida de un proyectil que actúa sólo Positrón. Antipartícula de un electrón; un electrón con carga positiva.

bajo la influencia de la gravedad.

Postulados de la relatividad especial. Primero: Todas las leyes de la Paralaje. Desplazamiento aparente de un objeto cuando lo ve un ob- naturaleza son iguales en todos los marcos de referencia que se

servador desde dos posiciones diferentes; con frecuencia se usa para

mueven de manera uniforme.

calcular la distancia de las estrellas.

Segundo: La rapidez de la luz en el espacio libre tiene el mismo Partícula alfa. Núcleo de un átomo de helio, que consiste en dos valor medido sin importar el movimiento de la fuente o el movi- neutrones y dos protones, expulsado por ciertos núcleos radiac-

miento del observador; esto es: la rapidez de la luz es invariable.

tivos.

Potencia. Tasa a la que se realiza trabajo o se transforma energía; Partícula beta. Electrón (o positrón) emitido durante el decaimiento igual al trabajo realizado o la energía transformada dividida entre

radiactivo de ciertos núcleos.

el tiempo; se mide en watts.

trabajo

Partículas elementales. Partículas subatómicas; los componentes bá-Potencia =

sicos de toda la materia, que consisten en dos clases de partículas:

tiempo

quarks y leptones.

Potencia eléctrica. Tasa de transferencia de energía eléctrica o tasa de Pascal (Pa) Unidad de presión del SI. Un pascal de presión ejerce realización de trabajo, que puede calcularse como el producto

una fuerza normal de 1 newton por metro cuadrado. Un kilopascal

de la corriente y el voltaje.

(kPa) es 1,000 pascales.

Energía eléctrica corriente voltaje

Patrón de interferencia. Patrón formado por el traslape de dos o más Potencia solar. Energía por unidad de tiempo derivada del Sol. Véase ondas que llegan al mismo tiempo a una región.

también constante solar.

Potencial eléctrico. Energía potencial eléctrica (en joules) por uni-Prisma. Sólido triangular hecho de un material transparente, como dad de carga (en coulombs) en una posición en un campo eléc-el vidrio, que separa la luz incidente mediante refracción en sus

trico; se mide en volts (1 V = 1 J/C) y a menudo se le denomina

colores componentes. Dichos colores componentes suelen deno-

voltaje.

minarse espectro.

Precesión. Bamboleo de un objeto giratorio, de forma tal que su eje

Proceso adiabático. Proceso, con frecuencia de expansión o compre-
de rotación traza un cono.

sión rápidas, en el que no entra ni sale calor de un sistema. Como

Presión. Fuerza por área superficial, donde la fuerza es normal (per-
resultado, un líquido o gas se enfriará si experimenta una expan-

pendicular) a la superficie; se mide en pascales. Véase también

sión, o se calentará si experimenta una compresión.

presión atmosférica.

Protón. Partícula con carga positiva que es uno de los dos tipos de
fuerza

nucleones en el núcleo de un átomo.

Presión = área

Proyectil. Cualquier objeto que se mueva a través del aire o del es-
Presión atmosférica. Presión ejercida contra los cuerpos sumergidos
pacio, sobre el que sólo actúa la gravedad (y la resistencia del aire,
en la atmósfera, que resulta del peso del aire que presiona hacia

si la hay).

abajo desde arriba. A nivel del mar, la presión atmosférica es de

Pseudociencia. Ciencia falsa que pretende ser ciencia real.

aproximadamente 101 kPa.

Pulida. Descripción de una superficie que es tan suave que las dis-
Principio. Hipótesis o enunciado general acerca de la relación de las
tancias entre elevaciones sucesivas de la superficie son menores que

cantidades naturales puestas a prueba una y otra vez, y que no se

aproximadamente un octavo de la longitud de onda de la luz u

han contradicho; también conocido como ley.

otra onda incidente de interés. El resultado es muy poca reflexión

Principio de Arquímedes. Enunciado sobre la relación entre la flo-

difusa.

tabilidad y el fluido desplazado: un objeto sumergido es sostenido

Punto ciego. Área de la retina donde todos los nervios que transpor-
por una fuerza igual al peso del fluido que desplaza.

tan información visual salen del ojo y van al cerebro; ésta es una

Principio de Avogadro. Volúmenes iguales de todos los gases a la
región donde no hay visión.

misma temperatura y presión contienen el mismo número de mo-

Punto focal. Para un lente convergente o un espejo cóncavo, el punto
léculas, 6.02 1023 en 1 mol (una masa en gramos igual a la masa

donde convergen los rayos de luz paralelos al eje principal. Para

molecular de la sustancia en unidades de masa atómica).

un lente divergente o un espejo convexo, el punto desde el cual

Principio de De Bernoulli. La presión de un fluido a lo largo de
parecen provenir tales rayos.

una línea de corriente dada disminuye a medida que aumenta la

Pupila. Abertura en el globo ocular por la cual pasa la luz.

rapidez del fluido.

Quark. Una de las dos clases de partículas elementales (la otra es el
Principio de combinación de Ritz. Para un elemento, las frecuen-
leptón). Dos de los seis quarks (arriba y abajo) son los componen-

cias de algunas líneas espectrales son o la suma o la diferencia de

tes fundamentales de los nucleones (protones y neutrones).

las frecuencias de otras dos líneas en el espectro de dicho elemento.

rad. Unidad usada para medir una dosis de radiación; la cantidad
Principio de correspondencia. Si una nueva teoría es válida, debe de
energía (en centijoules) absorbida de la radiación ionizante por

explicar los resultados verificados de la teoría anterior en la región

kilogramo de material expuesto.

donde ambas teorías se aplican.

Radiación. (a) Energía transmitida por ondas electromagnéticas.

Principio de equivalencia. Las observaciones realizadas en un mar-

(b) Las partículas cedidas por los átomos radiactivos como el ura-

co de referencia acelerado son indistinguibles de las observaciones

nio. No confundir radiación con radiactividad.

realizadas en un campo gravitacional.

Radiación electromagnética. Transferencia de energía por las rápi-
Principio de Fermat de menor tiempo. La luz toma la trayectoria das
oscilaciones de campos electromagnéticos, que viajan en forma

que necesita menos tiempo cuando va de un lugar a otro.

de ondas llamadas ondas electromagnéticas.

Principio de flotación. Un objeto flotante desplaza un peso de flui-
Radiación terrestre. Energía radiante emitida desde la Tierra.

do igual a su propio peso.

Radiactividad. Proceso del núcleo atómico que resulta en la emisión
Principio de Huygens. Las ondas de luz que se dispersan desde una
de partículas energéticas. Véase radiación.

fuente luminosa pueden considerarse como una superposición de

Radiactivo. Término aplicado a un átomo que tiene un núcleo ines-
diminutas ondas secundarias.

table que puede emitir de manera espontánea una partícula.

Principio de incertidumbre. Principio formulado por Heisenberg,
Radioterapia. Uso de la radiación como tratamiento para destruir en
el que afirma que la constante de Planck, h, establece un límite
células cancerosas.

sobre la exactitud de la medición a nivel atómico. Por consiguien-

te, no es posible medir con exactitud la posición ni la cantidad de

Rapidez. Qué tan rápido se mueve algo; la distancia que recorre un movimiento de una partícula al mismo tiempo, o la energía y el

objeto por unidad de tiempo; la magnitud de la velocidad. Véanse

tiempo asociados a una partícula simultáneamente.

también rapidez promedio, rapidez lineal, rapidez rotacional y rapidez tangencial.

Principio de Pascal. Los cambios de presión en cualquier punto en un fluido encerrado en reposo se transmiten sin disminución a

distancia

Rapidez =

todos los puntos en el fluido y actúan en todas direcciones.

tiempo

Principio de superposición. En una situación donde más de una Rapidez de escape. Rapidez que debe alcanzar un proyectil, sonda onda ocupa el mismo espacio al mismo tiempo, los desplazamien-espacial u otro objeto para escapar de la influencia gravitacional de tos se suman en cada punto.

la Tierra o del cuerpo celeste al cual esté más atraído.

Rapidez de onda. Rapidez con la que las ondas pasan por un punto Refracción. Plegamiento de un rayo de luz oblicuo cuando éste pasa particular.

de un medio transparente a otro. Esto es provocado por una dife-

Rapidez de onda = frecuencia longitud de onda

rencia en la rapidez de la luz en los medios transparentes. En gene-

ral, el cambio de dirección de una onda mientras cruza la frontera

Rapidez instantánea. Rapidez en cualquier instante.

entre dos medios en los que la onda viaja con diferentes rapideces.

Rapidez lineal. Distancia de trayectoria recorrida por unidad de
Regla de equilibrio.

tiempo; también se denomina simplemente rapidez.

F 0. Sobre un objeto o sistema de objetos

en equilibrio mecánico, la suma de fuerzas es igual a cero. Además,

Rapidez promedio. Distancia de la trayectoria dividida entre el in-0;
la suma de los momentos de torsión es igual a cero.

tervalo de tiempo.

Rehielo. Proceso de fundido bajo presión y la posterior recongela-
distancia total recorrida

Rapidez promedio =

ción cuando se quita la presión.

intervalo de tiempo

Rejilla de difracción. Serie de rendijas o surcos paralelos estrecha-
Rapidez rotacional. Número de rotaciones o revoluciones por uni-
mente espaciados que se usa para separar colores de luz mediante

dad de tiempo; con frecuencia se mide en rotaciones o revolucio-

interferencia.

nes por segundo o minuto.

Relatividad. Véanse teoría de la relatividad especial, postulados de
la Rapidez tangencial. Rapidez lineal a lo largo de una trayectoria
curva.

teoría de la relatividad especial y teoría de la relatividad general.

Rapidez terminal. Rapidez que logra un objeto en la que las fuerzas
Relativista. Perteneciente a la teoría de la relatividad; que se aproxi-
de resistencia, con frecuencia la resistencia del aire, compensan las
ma a la rapidez de la luz.

fuerzas de deriva, de modo que el movimiento es sin aceleración.

Relativo. Considerado en relación con algo más, dependiendo del
Rarefacción. Región de presión reducida en una onda longitudinal.

punto de vista o marco de referencia. En ocasiones se expresa "con

Rayo. Haz delgado de luz. También, una línea dibujada que muestra
respecto a".

la trayectoria de la luz en los diagramas de rayos ópticos. Un haz de
rem. Acrónimo de roentgen equivalent man (roentgen equivalente
radiación (por ejemplo, rayo beta).

en humano); unidad utilizada para medir el efecto de la radiación

Rayo alfa. Haz de partículas alfa (núcleos de helio) expulsados por
ionizante sobre los seres humanos.

ciertos núcleos radiactivos.

Remolino. Trayectorias ensortijadas cambiantes en el flujo turbulen-
Rayo beta. Haz de partículas beta (electrones o positrones) emitido
to de un fluido.

por ciertos núcleos radiactivos.

Resistencia. Véase resistencia eléctrica.

Rayo cósmico. Una de las varias partículas de alta rapidez que via-
Resistencia al deslizamiento. Fuerza de contacto que tiende a re-jan
por todo el Universo y se originan en eventos violentos en las

tardar el movimiento producido por el frotamiento mutuo de la

estrellas.

superficie de un objeto en movimiento con el material sobre el

Rayo gamma. Radiación electromagnética de alta frecuencia emitida
cual se desliza.

por los núcleos atómicos.

Resistencia del aire. Fricción, o arrastre, que actúa sobre algo que se
Rayo X. Radiación electromagnética, superior en frecuencia a la ul-
mueve a través del aire.

travioleta, emitida por los átomos cuando los electrones de los or-

Resistencia eléctrica. Oposición de un objeto al flujo de carga eléc-bitales más internos experimentan una excitación.

trica a través de él; se mide en ohms ().

Reacción en cadena. Reacción autosostenida que, una vez iniciada, Resistor. Dispositivo de un circuito diseñado para resistir el flujo de proporciona de manera constante la energía y la materia necesarias

carga.

para continuar la reacción.

Resolución. (a) Método de separación de un vector en sus partes Reacción química. Proceso de reordenamiento de átomos que trans-componentes. (b) Capacidad de un sistema óptico para definir con

forma una molécula en otra.

claridad o separar los componentes de un objeto visto.

Reactor nuclear. Aparato en el que tienen lugar reacciones controla-Resonancia. Fenómeno que ocurre cuando la frecuencia de las vidas de fisión o fusión nucleares.

braciones forzadas sobre un objeto coincide con la frecuencia na-

Reactor reproductor. Reactor de fisión nuclear que no sólo produce tural del objeto, lo que produce un aumento sorprendente de la

electricidad sino que produce más combustible nuclear que el que

amplitud.

consume al convertir un isótopo de uranio no fisionable en un

Resultante. Resultado neto de una combinación de dos o más vectores.

isótopo de plutonio fisionable. Véase también reactor nuclear.

Retina. Capa de tejido sensible a la luz en la parte posterior del ojo, Reflexión. Regreso de los rayos de luz desde una superficie en tal for-compuesto de pequeñas células sensibles a la luz llamadas bastones

ma que el ángulo al que regresa un rayo dado es igual al ángulo al

y conos. Los conos son sensibles a diferentes rangos del espectro

que golpea la superficie. Cuando la superficie reflejante es irregu-

visible, lo que permite la sensación de colores. Los bastones no

lar, la luz regresa en direcciones irregulares; ésta es reflexión difusa.

discriminan colores, sino que perciben la luz tenue.

En general, el rebote de regreso de una partícula u onda que golpea

Reverberación. Persistencia de un sonido, como en un eco, debida a la frontera entre dos medios.

reflexiones múltiples.

Reflexión difusa. Reflexión de ondas en muchas direcciones desde Revolución. Movimiento de un objeto que da vueltas alrededor de una superficie rugosa. Véase también pulida.

un eje que yace fuera del objeto.

Reflexión interna total. El 100% de reflexión (sin transmisión) de Rotación. Movimiento de giro que ocurre cuando un objeto rota en la luz que golpea la frontera entre dos medios a un ángulo mayor

torno a un eje ubicado dentro del objeto (por lo general un eje que

que el ángulo crítico.

atraviesa su centro de masa).

rpm. Abreviatura de rotaciones o revoluciones por minuto.

Taquión. Partícula hipotética que puede viajar más rápido que la luz Ruido. En términos científicos, sonido asociado a vibraciones irre-y por ende moverse hacia atrás en el tiempo.

gulares.

Tasa. Qué tan rápido ocurre algo o cuánto cambia algo por unidad de s. Abreviatura de segundo.

tiempo; un cambio en una cantidad dividido entre el tiempo que

Satélite. Proyectil o cuerpo celeste más pequeño que orbita un cuer-
tarda en ocurrir el cambio.

po celeste más grande.

Tau. La partícula elemental más pesada de la clase de partículas ele-
Saturada. Término aplicado a una sustancia, como el aire, que con-
mentales llamadas leptones.

tiene la cantidad máxima de otra sustancia, como vapor de agua, a

Tecnología. El método y los medios de resolver problemas prácticos
una temperatura y presión determinadas.

mediante la aplicación de los hallazgos de la ciencia.

Segundo (s). Unidad de tiempo estándar del SI.

Telescopio. Instrumento óptico que forma imágenes de objetos muy
Semiconductor. Dispositivo fabricado con material no sólo con pro-
distantes.

piedades que caen entre las de un conductor y las de un aislante,

Temperatura. Medida de la energía cinética traslacional promedio
sino también con resistencia que cambia de manera abrupta cuan-
por molécula de una sustancia; se mide en grados Celsius o Fah-

do cambian otras condiciones, como temperatura, voltaje y campo

renheit o en kelvins.

eléctrico o magnético.

Tensión superficial. Tendencia de la superficie de un líquido a con-
Señal analógica. Señal basada en una variable continua, en
oposición traerse en área y, por tanto, se comporta como una
membrana

a una señal digital constituida de cantidades discretas.

elástica estirada.

Señal digital. Señal constituida con cantidades o señales discretas,
en Teorema trabajo-energía. El trabajo realizado sobre un objeto es

oposición a una señal analógica, que se basa en una señal continua.

igual a la energía cinética ganada por el objeto.

SI. Abreviatura de Système International, un sistema internacional de Trabajo 5 EC

unidades de medida métrica aceptado y usado por los científicos

Teoría. Síntesis de un gran cuerpo de información que abarca hipó- de todo el mundo. Véase el Apéndice A para más detalles.

tesis bien comprobadas y verificadas sobre aspectos del mundo

Simultaneidad. Que ocurre al mismo tiempo. En relatividad espe- natural.

cial, dos eventos que son simultáneos en un marco de referencia no

Teoría cuántica. Teoría que describe el micromundo, donde muchas necesitan ser simultáneos en un marco que se mueve con respecto

cantidades son granulares (en unidades llamadas cuantos), en lugar

al primer marco.

de continuas, y donde las partículas de luz (fotones) y las partícu -

Sobretono. Término musical para el caso en el que el primer sobreto- las de materia (como los electrones) muestran propiedades ondula-

no es el segundo armónico. Véase también tono parcial.

torias así como corpusculares.

Solidificar. Volverse sólido, como en la congelación o el fraguado Teoría de la relatividad especial. Teoría abarcadora de espacio y del concreto.

tiempo que sustituye la mecánica newtoniana cuando las velocida-

Sólido. Fase de la materia caracterizada por un volumen y una forma des son muy grandes; la introdujo Albert Einstein en 1905. Véase

definidos.

también postulados de la relatividad especial.

Teoría de la relatividad general.

Sombra. Región sombreada que aparece donde los rayos de luz son
Generalización de Einstein de la re-bloqueados por un objeto.

latividad especial, que aborda el movimiento acelerado y presenta

una teoría geométrica de la gravitación.

Sonido. Fenómeno de onda longitudinal que consiste en compre-

siones y rarefacciones sucesivas del medio a través del cual viaja

Termodinámica. Estudio del calor y su transformación en energía la
onda.

mecánica, caracterizada por dos leyes principales:

Primera ley: Un replanteamiento de la ley de conservación de la
Sonoridad. Sensación fisiológica directamente relacionada con la in-
energía para su aplicación a sistemas que involucran cambios de

tensidad o el volumen del sonido. La sonoridad relativa, o nivel de

temperatura: siempre que se agrega calor a un sistema, lo transfor-

sonido, se mide en decibeles.

ma en una cantidad igual de alguna otra forma de energía.

Sublimación. Conversión directa de una sustancia de la fase sólida a
Segunda ley: El calor no puede transferirse de un cuerpo más frío a
la de vapor sin pasar por la fase líquida.

un cuerpo más caliente sin la realización de trabajo por un agente

Superconductor. Material que es un conductor perfecto, con cero
externo. Además, todos los sistemas tienden a desordenarse cada

resistencia al flujo de carga eléctrica.

vez más con el tiempo.

Supersónico. Que viaja más rápido que la rapidez del sonido.

Termómetro. Dispositivo usado para medir temperatura, por lo ge-

Sustentación. En las aplicaciones del principio de Bernoulli, la fuer-neral en grados Celsius, Fahrenheit o kelvins.

za ascendente neta producida por la diferencia entre las presiones

Termostato. Tipo de válvula o interruptor que responde a cambios ascendente y descendente. Cuando la sustentación es igual al peso,

de temperatura y que se usa para controlar la temperatura de algo.

es posible el vuelo horizontal.

Tiempo mínimo. Véase principio de Fermat de tiempo mínimo.

Tabla periódica. Cuadro que menciona los elementos por número Tira bimetálica. Dos tiras de diferentes metales soldadas o remacha-atómico y por arreglo electrónico, de modo que los elementos

das juntas. Puesto que las dos sustancias se expanden o contraen

con propiedades químicas similares están en la misma columna

a diferentes tasas cuando se calientan o enfrían, la tira se dobla; se (grupo). Véase Figura 11.9, página 216.

usa en termostatos.

Tangente. Línea que toca una curva sólo en un lugar y es paralela a la Tono parcial. Uno de los muchos tonos que constituyen un sonido curva en dicho punto.

musical. Cada tono parcial tiene sólo una frecuencia. El parcial

más bajo de un sonido musical se llama frecuencia fundamental.

V. (a) Cuando es v minúscula cursiva, símbolo de la rapidez o la ve-Cualquier parcial cuya frecuencia sea un múltiplo de la frecuencia

locidad. (b) Cuando es V mayúscula, abreviatura de voltaje y volt.

fundamental se llama armónico. La frecuencia fundamental tam-

Vacío. Ausencia de materia.

bién se llama primer armónico. El segundo armónico tiene el do-

Valle. Parte más baja de una onda; en contraste con la parte más alta, ble de frecuencia que la fundamental; el tercer armónico, tres veces

una cresta.

la frecuencia, y así sucesivamente.

Vaporización. Proceso de un cambio de fase de líquido a vapor; eva-Trabajo (W). Producto de la fuerza sobre un objeto y la distancia a poración.

través de la que se mueve el objeto (cuando la fuerza es constante

y el movimiento es en una línea recta en la dirección de la fuerza);

Vector. Flecha cuya longitud representa la magnitud de una cantidad se mide en joules.

y cuya dirección representa la dirección de la cantidad.

Velocidad. Rapidez de un objeto y su dirección de movimiento; una Trabajo fuerza distancia

cantidad vectorial.

Transformador. Dispositivo para aumentar o reducir el voltaje o Velocidad de onda. Rapidez de onda enunciada con la dirección de transferir energía eléctrica de una bobina de alambre a otra me-viaje.

diante inducción electromagnética.

Velocidad rotacional. Rapidez rotacional junto con una dirección Transistor. Dispositivo utilizado en los circuitos eléctricos como in-para el eje de rotación o revolución.

terruptor o para amplificar una señal. Véase semiconductor.

Velocidad tangencial. Velocidad tangente a la trayectoria de un Translúcido. Término aplicado a los materiales que dejan pasar luz proyectil.

pero la dispersan en todas direcciones.

Velocidad terminal. Rapidez terminal junto con la dirección del mo-
Transmutación. Conversión de un núcleo atómico de un elemento
vimiento (abajo para objetos que caen).

en un núcleo atómico de otro elemento por una pérdida o ganan-

Ventaja mecánica. Razón de la fuerza de salida con respecto a la
fuer-cia en el número de protones debido a la emisión o absorción de

za de entrada para una máquina.

partículas cargadas.

Vibración. Oscilación; un movimiento repetitivo de ida y vuelta en
Transparente. Término aplicado a los materiales que permiten el
torno a una posición de equilibrio: un "contoneo que se repite

paso de la luz a través de ellos en líneas rectas.

en el tiempo".

Tritio. Isótopo radiactivo inestable del hidrógeno cuyo átomo tiene
Vibración forzada. Vibración de un objeto causada por las vibracio-
un protón, dos neutrones y un electrón.

nes de un objeto cercano. La caja de resonancia en un instrumento

Turbina. Rueda de álabes activada con vapor, agua u otra potencia,
musical amplifica el sonido mediante una vibración forzada.

que se usa para realizar trabajo.

Vida media. Tiempo necesario para que decaiga la mitad de los áto-
Turbogenerador. Generador que es impulsado por una turbina.

mos en una muestra de isótopos radiactivos. Este término también

Ultrasónico. Término aplicado a las frecuencias sonoras por arriba
sirve para describir los procesos de decaimiento en general.

de 20,000 Hz, el límite superior normal de la audición humana.

Volt (V). Unidad del potencial eléctrico del SI. Un volt es la diferen-
Ultravioleta (UV). Ondas electromagnéticas de frecuencias superio-
cia de potencial eléctrico a través de la cual un coulomb de carga

res a las de la luz violeta.

gana o pierde 1 joule de energía. 1 V 1 J/C.

uma. Abreviatura de unidad de masa atómica.

Voltaje. "Presión" eléctrica o una medida de la diferencia de potencial eléctrico.

Umbra. Parte oscura de una sombra donde toda la luz es bloqueada.

Véase también penumbra.

energía potencial eléctrica

Voltaje =

unidad de carga

Unidad de masa atómica (uma). Unidad estándar de masa atómica; se basa en la masa del átomo de carbono común, al que arbitraria-
Voltímetro. Galvanómetro calibrado para leer diferencias de potencial.

mente se le da el valor de exactamente 12. Una uma con valor de 1

Volumen. Cantidad de espacio que ocupa un objeto. Otra palabra es un doceavo la masa de este átomo de carbono común.

para la "sonoridad" de un sonido.

Unidad térmica británica (BTU: british thermal unit). Cantidad W. (a) Abreviatura de watt. (b) Cuando es W cursiva, abreviatura de de calor necesaria para aumentar la temperatura de 1 libra de agua

trabajo.

en 1 grado Fahrenheit.

Watt (W). Unidad de potencia del SI. Un watt se gasta cuando UV. Abreviatura de ultravioleta.

1 joule de trabajo se realiza en 1 segundo; 1 W 1 J/s.

Créditos

Créditos de texto y arte

2014, p. 230. Reimpreso y reproduci-

Créditos de fotografías

do electrónicamente con permiso de

87: (Fig 5.Un4) izquierda y (Fig 5.Un5)

Pearson Education, Inc., Upper Saddle xx: Lillian Lee Hewitt

derecha: Hewitt, Paul, Conceptual

River, New Jersey.

1: John A. Suchocki/Paul G. Hewitt

Physics, 6th Ed., © 1989. Reimpreso

323: (Fig 17.5) Suchocki, John A.,

2: fotos 1–3: Gretchen Hewitt/Paul

y reproducido electrónicamente con

Conceptual Chemistry, 5th Ed., ©

G. Hewitt

permiso de Pearson Education, Inc.,

2014, p. 239. Reimpreso y reproduci-

7: derecha: Peter Barritt/Alamy

Upper Saddle River, New Jersey.

do electrónicamente con permiso de

7: izquierda: Simon Fishley/South African

87: (Fig 5.Un6) derecha: Hewitt, Paul G.;

Pearson Education, Inc., Upper Saddle

Astronomical Observatory

Lyons, Suzanne A., Suchocki, John

River, New Jersey.

19: fondo: Arriba Seller/Shutterstock

A.; Yeh, Jennifer, Conceptual Integra-

328: (Fig 17.15) Suchocki, John A.,

19: foto: Duane Ackerman/Paul G. Hewitt

ted Science, 2nd Ed., © 2013, p. 41.

Conceptual Chemistry, 5th Ed., ©

20: foto 1: Monica Davey/Paul G. Hewitt

Reimpreso y reproducido electró-

2014, p. 231. Reimpreso y reproduci-

20: foto 2: Howard Brand/Paul G. Hewitt

nicamente con permiso de Pearson

do electrónicamente con permiso de

20: foto 3: Paul G. Hewitt

Education, Inc., Upper Saddle River,

Pearson Education, Inc., Upper Saddle 20: foto 4: Pat Hall, City College of New Jersey.

River, New Jersey.

San Francisco/Paul G. Hewitt

118: (Fig 7.14) Hewitt, Paul G.; Lyons, Su-

357: (Al intentar entender…) Hewitt, Paul

21: Paul G. Hewitt

zanne A., Suchocki, John A.; Hewitt,

G.; Suchocki, John A.; Hewitt, Leslie

22: Erich Lessing/Art Resource, NY

Leslie A., Conceptual Integrated Science,

A., Conceptual Physical Science, 5th

23: Photos.com

5th Ed., © 2012, p. 76. Reimpreso

Ed., © 2012. Reimpreso y reproduci-

24: Nicola Lorusso/Alinari/Art Resource,

y reproducido electrónicamente con

do electrónicamente con permiso de

NY

permiso de Pearson Education, Inc.,

Pearson Education, Inc., Upper Saddle 29: Pat Hall, City College of San Francisco/

Upper Saddle River, New Jersey.

River, New Jersey.

Paul G. Hewitt

119: (Fig 7.Un3) Hewitt, Paul G.; Lyons,

383: (Fig 20.15) Hewitt, Paul G.; Lyons,

30: Paul G. Hewitt

Suzanne A., Suchocki, John A.;

Suzanne A., Suchocki, John A.; Yeh,

39: fotos 1–2: Paul G. Hewitt

Hewitt, Leslie A., Conceptual Physical

Jennifer, Conceptual Integrated Science,

39: foto 3: Fredrik Jensen/Paul G. Hewitt

Science, 5th Ed., © 2012, p. 77. Reim-

2nd Ed., © 2013, p. 185. Reimpreso

39: foto 4: Chelsie Liu/Paul G. Hewitt

preso y reproducido electrónicamente

y reproducido electrónicamente con

40: Mediacolor's/Alamy

con permiso de Pearson Education,

permiso de Pearson Education, Inc.,

41: PeterAustin/iStockphoto

Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

Upper Saddle River, New Jersey.

50: Andrew D. Bernstein/NBAE/Getty

131: (Fig 7.Un14, Fig 7.Un15, y Fig 7.

476: (Fig 25.13) Hewitt, Paul G.; Lyons,

Images

Un16) Hewitt, Paul G.; Lyons, Suzan-

Suzanne A., Suchocki, John A.;

57: fotos 1–2: Paul G. Hewitt

ne A., Suchocki, John A.; Hewitt, Les-

Hewitt, Leslie A., Conceptual Physical 57: foto 3: Ocean/Corbis lie A., Conceptual Physical Science, 5th

Science, 5th Ed., © 2012, p. 229.

57: foto 4: Paul G. Hewitt

Ed., © 2012, pp. 88, 89. Reimpreso

Reimpreso y reproducido electró-

58: Georgios Kollidas/Fotolia

y reproducido electrónicamente con

nicamente con permiso de Pearson

60: Addison Wesley Longman, Inc./ Pearson

permiso de Pearson Education, Inc.,

Education, Inc., Upper Saddle River,

63: MiloVad/Shutterstock

Upper Saddle River, New Jersey.

New Jersey.

67: George Resch/Fundamental

201: (Fig 10.Un9) Hewitt, Paul G.; Lyons,

482: (Fig 25.Un2 y Fig 25.Un3) Hewitt,

Photographs

Suzanne A., Suchocki, John A.;

Paul G.; Lyons, Suzanne A., Suchocki, 74: foto 1: Exploratorium

Hewitt, Leslie A., Conceptual Physical

John A.; Hewitt, Leslie A., Conceptual

74: foto 2: Russ Kinne/Jupiter Images

Science, 5th Ed., © 2012, p.113.

Physical Science, 5th Ed., © 2012, p.

74: foto 3: Toby Jacobson/Paul G. Hewitt

Reimpreso y reproducido electró-

234. Reimpreso y reproducido elec-

74: foto 4: Paul G. Hewitt

nicamente con permiso de Pearson

trónicamente con permiso de Pearson

75: izquierda: Paul G. Hewitt

Education, Inc., Upper Saddle River,

Education, Inc., Upper Saddle River,

75: derecha: Paul G. Hewitt

New Jersey.

New Jersey.

81: arriba: John A. Suchocki/

257: (Fig 13.29) Suchocki, John A.,

605: (Fig 32.3 y Fig 32.5) Suchocki, John

Paul G. Hewitt

Conceptual Chemistry, 5th Ed., ©

A., Conceptual Chemistry, 4th Ed., ©

81: abajo: Lillian Lee Hewitt/

2014, p 236. Reimpreso y reproduci-

2011, pp. 96, 97. Reimpreso y repro-

Paul G. Hewitt

do electrónicamente con permiso de

ducido electrónicamente con permiso

85: Jerry Lin/Shutterstock

Pearson Education, Inc., Upper Saddle

de Pearson Education, Inc., Upper

87: Paul G. Hewitt

River, New Jersey.

Saddle River, New Jersey.

90: fotos 1–4: Paul G. Hewitt

296: (Fig 15.22) Suchocki, John A.,

91: Paul G. Hewitt

Conceptual Chemistry, 5th Ed., ©

92: Rafael Ramirez/Fotolia

C-1

C-2

Créditos

93: Sinibomb Images/Alamy

Paul G. Hewitt

237: Paul G. Hewitt

94: Oliver Furrer/Alamy

160: foto 2: NASA

238: Irv Beckman/Dorling Kindersley, Inc.

95: Paul G. Hewitt

160: fotos 3–4: Paul G. Hewitt

239: Adam Seward RF/Alamy

96: Paul G. Hewitt

161: Paul G. Hewitt

243: Paul G. Hewitt

100: Paul G. Hewitt

167: izquierda: NASA Johnson Space

244: fotos 1–2: Paul G. Hewitt

102: izquierda: PSSC Physics ©1965,

Center

244: foto 3: Alan Spencer Fotography/

Education Development Center, Inc.;

167: derecha: NASA

Alamy

D.C. Heath & Company

182: foto 1: Bob Abrams/Paul G. Hewitt

244: foto 4: Mark Serway/Paul G. Hewitt

102: derecha: PSSC Physics ©1965, Educa-

182: fotos 2–3: Enrique Baez, JPL/Paul G.

245: Georgios Kollidas/Fotolia

tion Development Center, Inc.; D.C.

Hewitt

246: arriba: Paul G. Hewitt

Heath & Company

182: foto 4: Pat Hall, City College of San

246: recuadro: Paul G. Hewitt

106: izquierda: Paul G. Hewitt

Francisco/Paul G. Hewitt

247: Corbis Premium RF/Alamy

106: derecha: Paul G. Hewitt

183: Paul G. Hewitt

248: Tim Moore/Alamy

109: foto 1: Majken Korsager/

185: arriba: Richard Megna/Fundamental

253: izquierda: Dual Aspect Scotland

Paul G. Hewitt

Photographs

Collection/Alamy

109: fotos 2–4: Paul G. Hewitt

185: abajo: Paul G. Hewitt

253: derecha: Alamy

110: A. Danvers/RMN-Grand Palais/

187: Paul G. Hewitt

256: Dmitry Kalinovsky/Shutterstock

Art Resource, NY

188: AP Foto/Al Behrman

257: arriba: Paul G. Hewitt

111: Liu Dawei Xinhua News Agency/

190: Andrew D. Bernstein/NBAE/Getty

257: abajo: Andrei Kuzmik/Shutterstock

Newscom

Images

258: Paul G. Hewitt

112: NASA Images

191: NASA/Johnson Space Center

263: arriba: Paul G. Hewitt

115: arriba: Paul G. Hewitt

194: arriba: Paul G. Hewitt

263: abajo: Bruce Novak/Paul G. Hewitt

115: abajo: Paul G. Hewitt

194: abajo: Diane Schiumo/Fundamental

264: foto 1: Jens Ekberg/Paul G. Hewitt

116: izquierda: Michael Vollmer/

Photographs

264: foto 2: bosquejo de Gaspar Schott

Paul G. Hewitt

195: NASA/Goddard Space Flight Center

del experimento de los hemisferios de

116: derecha: Michael Vollmer/

196: arriba: Edinburgh/Royal Observatory/

Magdeburgo de Otto von Guericke.

Paul G. Hewitt

Science Source

264: foto 3: Jim Culleton/Paul G. Hewitt

118: Frank Naylor/Alamy

196: abajo: Erich Lessing/Art Resource, NY

264: foto 4: Aage Mellon/Paul G. Hewitt

121: Pat Hall, City College of San

200: arriba: NASA/Goddard Space Flight

265: Anette Zetterberg/Paul G. Hewitt

Francisco/Paul G. Hewitt

Center

267: Paul G. Hewitt

123: Angela Lewis/Chattanooga Times Free 200: abajo: NASA Earth Observing System 269: Paul G. Hewitt

Press/AP Images

203: axz65/Fotolia

276: arriba: Olegusk/Shutterstock

124: Paul G. Hewitt

207: fondo: Arriba Seller/Shutterstock

276: abajo: David Hewitt/Paul G. Hewitt

125: Clynt Garnham/Alamy

207: foto: Mei Tuck Hu/Paul G. Hewitt

283: fondo: Arriba Seller/Shutterstock

127: Pat Hall, City College of San

208: foto 1: European Communities,

283: foto: Paul G. Hewitt

Francisco/Paul G. Hewitt

1995-2006

284: foto 1: Rainer Albiez/

131: Paul G. Hewitt

208: foto 2: Paul G. Hewitt

Shutterstock

132: fotos 1–2: Paul G. Hewitt

208: foto 3: Mopic/Fotolia

284: fotos 2–4: Paul G. Hewitt

132: foto 3: Anna Marie Darden/Paul

208: foto 4: Darlene Tucker/Paul G. Hewitt

284: foto 5: Nuridsany et Perennou/

G. Hewitt

209: Bettmann/Corbis

Science Source

132: fotos 4–5: Pat Hall, City College

212: izquierda: The Enrico Fermi Institute

285: Barney Burstein/Fine Art/Corbis

of San Francisco/Paul G. Hewitt

212: derecha: Cortesía de IBM Archives.

292: arriba: Lu Engineers, Penfield, NY

133: Paul G. Hewitt

No se permite el uso no autorizado.

292: medio: Hu Meidor/Paul G. Hewitt

136: Paul G. Hewitt

215: Paul G. Hewitt

292: abajo: AP Images

137: Purple Collar Pet Photography/Flickr/

219: Getty Images

293: David A. Vasquez/Paul G. Hewitt

Getty images

226: foto 1: PASIEKA/Science Photo

296: Sportlibrary/Shutterstock

138: Peter Nelson/Paul G. Hewitt

Library/Alamy

298: Paul G. Hewitt

141: Richard Megna/Fundamental

226: fotos 2–4: Paul G. Hewitt

302: fotos 1–3: Paul G. Hewitt

Photographs

227: Paul G. Hewitt

303: Paul G. Hewitt

142: Steven Kingsman/Alamy

228: arriba: KdEdesign/Shutterstock

304: Incamerastock/Alamy

143: Paul G. Hewitt

228: abajo: Dee Breger/Science Source

305: Paul G. Hewitt

144: Paul G. Hewitt

230: Paul G. Hewitt

306: arriba: Paul G. Hewitt

146: Paul G. Hewitt

231: Andrew Davidhazy

306: abajo: Nancy Roger/Paul G. Hewitt

150: Paul G. Hewitt

233: Lillian Lee Hewitt/Paul G. Hewitt

309: arriba: David J. Green/Alamy

152: Evolve/Fotoshot/ZUMAPRESS/

234: izquierda: Georgescu Gabriel/

309: abajo: Tai McNelis/Paul G. Hewitt

Newscom

Shutterstock

310: Paul G. Hewitt

154: Paul G. Hewitt

234: derecha: Paul G. Hewitt

311: arriba: Epcot Images/Alamy

158: Lillian Lee Hewitt/Paul G. Hewitt

234: abajo: Paul G. Hewitt

311: abajo: Paul G. Hewitt

159: Pat Hall, City College of San

235: arriba: Gary Blakeley/Fotolia

315: izquierda: mtsyri/Shutterstock

Francisco/Paul G. Hewitt

235: abajo: Lillian Lee Hewitt/Paul G.

315: derecha: Lillian Lee Hewitt/Paul

160: foto 1: Daday van den Berg/

Hewitt

G. Hewitt

Cr éd i tos

C-3

320: fotos 1–2: Paul G. Hewitt

394: Paul G. Hewitt

464: Jamenpercy/Fotolia

320: foto 3: Copyright The Exploratorium,

395: Beth A. Keiser/AP Images

465: arriba: Martin Oeggerli/Science

www.exploratorium.edu. Fotografía de 396: arriba: Kevin Winter/ Getty Images Source

Nicole Minor

396: abajo: Tyler Johnson/Paul G. Hewitt

465: abajo: Guy Croft SciTech/Alamy

320: foto 4: Tammy Tunison/Paul

397: arriba: Matt Sayles/AP Images

469: fotos 1–2: Lillian Lee Hewitt/Paul G.

G. Hewitt

397: abajo: Ronald B. Fitzgerald

Hewitt

321: Paul G. Hewitt

398: David Corio/Redferns/

469: foto 3: Kobus Nel/Paul G. Hewitt

322: arriba: Paul G. Hewitt

Getty Images

469: foto 4: Paul G. Hewitt

322: medio: Lillian Lee Hewitt

399: arriba: Hu Meidor/Paul G. Hewitt

470: Georgios Kollidas/Fotolia

322: abajo: Lillian Lee Hewitt/Paul

399: abajo: Andrew Syred/Science Source

472: John A. Suchocki/Paul G. Hewitt

G. Hewitt

403: Paul G. Hewitt

476: Will Maynez/Paul G. Hewitt

323: Paul G. Hewitt

405: fondo: Arriba Seller/Shutterstock

485: fondo: Arriba Seller/

331: arriba: Paul G. Hewitt

405: foto: Bob Abrams/Paul G. Hewitt

Shutterstock

331: abajo: Keith Srakocic/AP Images

406: foto 1: Paul G. Hewitt

485: foto: Victor Lee/Paul G. Hewitt

336: fotos 1–3: Paul G. Hewitt

406: foto 2: Photowings/Fotolia

486: foto 1: CNES French Space Agency

336: foto 4: Rune Myhre/Paul G. Hewitt

406: fotos 3–4: Kobus Nel/Paul G. Hewitt

486: foto 2: Paul G. Hewitt

337: Chris Hellier/Alamy

407: Tomas Abad/Alamy

486: fotos 3–4: Dean Baird/Paul

340: Paul G. Hewitt

412: Little Tomato Studio/Fotolia

G. Hewitt

342: Mark Duffy/Alamy

413: arriba: Will Maynez/Paul G. Hewitt

486: foto 5: Paul Doherty/Paul

346: Dennis Wong/Paul G. Hewitt

413: abajo: Timothy Hodgkinson/

G. Hewitt

347: Michael Howell/Robert Harding

Shutterstock

487: Clive Streeter/Dorling Kindersley, Inc.

World Imagery

415: Paul G. Hewitt

489: arriba: Linda Novak/Paul G. Hewitt

349: Paul G. Hewitt

420: Westinghouse/AP images

489: abajo: Bruce Novak/Paul G. Hewitt

355: fondo: Arriba Seller/Shutterstock

423: medio: Eid Ahmed/Paul G. Hewitt

490: Paul G. Hewitt

355: foto: Jojo Dijamco/Paul G. Hewitt

423: abajo: Dorling Kindersley, Inc.

492: Paul G. Hewitt

356: fotos 1–5: Paul G. Hewitt

424: Paul G. Hewitt

493: Paul G. Hewitt

357: Copyright The Exploratorium,

430: foto 1: David Housden/Paul

494: arriba: Diane Schiumo/Fundamental

www.exploratorium.edu. Fotografía de

G. Hewitt

Photographs

Nancy Rodger

430: foto 2: Sara Puno/Paul G. Hewitt

494: abajo: Diane Schiumo/Fundamental

360: Brenda Tharp/Jupiter Images

430: fotos 3–4: Pat Hall, City College of

Photographs

363: Fundamental Photographs

San Francisco/Paul G. Hewitt

496: Ralph C. Eagle/Science Source

365: Eliot Elisofon/Time Life Pictures/

431: Pictorial Press/Alamy

498: Addison Wesley Longman, Inc./

Getty Images

432: Addison Wesley Longman, Inc./

Pearson

367: U.S. Navy News Foto

Pearson

504: foto 1: Eric Muller/Paul G. Hewitt

368: Ted Kinsman/Science Source

433: Billy Hustace/Corbis

504: foto 2: vario images GmbH &

374: fotos 1–2: Paul G. Hewitt

435: Tim Ridley/Dorling Kindersley, Inc.

Co.KG/Alamy

374: foto 3: Carl Angell/Paul G. Hewitt

437: Tim Ridley/Dorling Kindersley, Inc.

504: fotos 3–4: Peter Lang/Paul G. Hewitt

374: foto 4: Duane Ackerman/Paul G.

441: izquierda: Paul G. Hewitt

504: foto 5: Joy Wetherhold/Paul G.

Hewitt

441: derecha: Evan Jones/Paul G. Hewitt

Hewitt

375: Paul G. Hewitt

442: Addison Wesley Longman, Inc./

505: North Wind Picture Archives/Alamy

377: Paul G. Hewitt

Pearson

506: medio: Cordelia Molloy/Science

380: izquierda: Paul G. Hewitt

444: Addison Wesley Longman, Inc./

Source

380: derecha: Lebrecht Music and Arts

Pearson

506: abajo: Hu Meidor/Paul G. Hewitt

Photo Library/Alamy

445: Paul G. Hewitt

509: Dave Vasquez/Paul G. Hewitt

381: arriba: UHB Trust/Stone/

452: foto 1: Fred Myers

510: medio: Paul G. Hewitt

Getty Images

452: foto 2: Paul G. Hewitt

510: abajo: Dave Vasquez/Paul G. Hewitt

381: abajo: Crisod/Fotolia

452: foto 3: Pat Hall, City College of San

511: Paul G. Hewitt

383: arriba: Paul G. Hewitt

Francisco/Paul G. Hewitt

512: arriba: Hu Meidor/Paul G. Hewitt

383: abajo izquierda: Associated Press/

452: foto 4: Alan Davis/Paul G. Hewitt

512: abajo: Mark Rutledge/Fotolia

AP Images

453: Everett Collection/Newscom

513: medio: Kushch Dmitry/Shutterstock

383: abajo derecha: Paul G. Hewitt

455: Richard Megna/Fundamental

513: abajo: Paul G. Hewitt

386: Addison Wesley Longman, Inc./

Photographs

514: UgputuLf SS/Shutterstock

Pearson

456: Richard Megna/Fundamental

515: medio: Shannon Stent/E+/Getty Images

391: fotos 1–2: Paul G. Hewitt

Photographs

515: Abajo: Stephen Mcsweeny/

391: foto 3: Jojo Dijamco/Paul G. Hewitt

457: Duane Ackerman/Paul G. Hewitt

Shutterstock

391: foto 4: Dean Baird/Paul G. Hewitt

459: medio: Richard Megna/Fundamental

519: foto 1: Paul G. Hewitt

392: arriba: Sheila Terry/Science Source

Photographs

519: foto 2: Barbara Thomas/Paul G.

392: abajo: Bizuayehu Tesfaye/Invision/

459: abajo: STR/AP images

Hewitt

AP Images

460: John Suchocki/Paul G. Hewitt

519: foto 3: Fred Myers

393: arriba: ZUMA Press, Inc./Alamy

461: Addison Wesley Longman, Inc./

519: foto 4: Cathy Barthelemy/Paul G.

393: abajo: ZUMA Press, Inc./Alamy

Pearson

Hewitt

C-4

Créditos

520: Bridgeman-Giraudon/Art Resource, NY

567: foto a: GIPhotostock/Science Source

610: Bettmann/Corbis

522: Paul G. Hewitt

567: fotos b–d: Department of Physics, Im-

615: foto 1: Stanley Micklavzina/Paul G.

524: arriba: Bill Bachman/Alamy

perial College London/Science Source

Hewitt

524: medio: Institute of Paper Science &

571: arriba: Aaron Haupt/Science Source

615: foto 2: Minemero/Fotolia

Technology

571: abajo: Mark A. Schneider/Science

615: foto 3: Roger Rassool/Paul G. Hewitt

526: Ted Mathieu/Paul G. Hewitt

Source

615: foto 4: Pat Hall, City College of San

527: Robert Greenler/Paul G. Hewitt

573: arriba: Lillian Lee Hewitt

Francisco/Paul G. Hewitt

531: Paul G. Hewitt

573: abajo: Paul G. Hewitt

616: Underwood & Underwood/Corbis

533: Sigurd/Fotolia

577: Richard Megna/Fundamental

617: National Library of Medicine

534: iStockphoto/Thinkstock

Photographs

618: Richard Megna/Fundamental

536: Paul G. Hewitt

582: foto 1: Neil Chapman/Paul G. Hewitt

Photographs

537: Duane Ackerman/Paul G. Hewitt

582: foto 2: CERN/European Organization 619: Charles D. Winters/ Science Source 541: Paul G. Hewitt

for Nuclear Research

620: iStockphoto/Thinkstock

542: arriba: Milo Patterson/Paul G. Hewitt

582: foto 3: Anne Cox/Paul G. Hewitt

621: Jerry Nulk y Sra Joshua Baker/

542: abajo: Paul G. Hewitt

582: foto 4: David Smith/Paul G. Hewitt

Paul G. Hewitt

543: alexandro900/Fotolia

583: SSPL/Getty Images

622: Chris Priest/Science Source

544: foto 1: Robert Greenler/Paul G.

588: Amy Snyder, Exploratorium/Paul G.

626: izquierda: Wellfoto/Fotolia

Hewitt

Hewitt

626: derecha: Roger Rassool/Paul G.

544: foto 2: Paul G. Hewitt

589: arriba: Albert Rose/Paul G. Hewitt

Hewitt

544: foto 3: Udo Von Mulert/Paul G.

589: abajo: Paul G. Hewitt

627: arriba: Lillian Lee Hewitt/Paul G.

Hewitt

590: arriba: Paul G. Hewitt

Hewitt

544: foto 4: Janie Head/Paul G. Hewitt

590: abajo: Meggers Gallery/AIP/Science

627: medio: Ernest Orlando

545: arriba: Paul G. Hewitt

Source

627: abajo: Richard Wareham Fotografie/

545: abajo: Dudarev Mikhail/Shutterstock

591: arriba: GIPhotostock/Science Source

Alamy

546: PSSC Physics ©1965, Education De-

591: medio: Will & Deni McIntyre/ Science 637: foto 1: Science Source velopment Center, Inc.; D.C. Heath

Source

637: foto 2: SPL/Science Source

& Company

591: abajo: P. G. Merli, G. F. Missiroli, y

637: foto 3: AKG/Science Source

547: Ken Kay/Fundamental Photographs

G. Pozzi. "On the Statistical Aspect

637: foto 4: Science Source

549: medio: Paul G. Hewitt

of Electron Interference Phenome-

637: foto 5: World History Archive/Alamy

549: abajo: PSSC Physics ©1965, Educa-

na," American Journal of Physics, Vol.

641: Corbis

tion Development Center, Inc.; D.C.

44, No 3, marzo 1976. Copyright ©

642: Argonne National Laboratory

Heath & Company

1976 de the American Association of

645: Comstock Images

551: Fred Myers

Physics Teachers

649: Lillian Lee Hewitt/Paul G. Hewitt

553: GIPhotostock / Science Source

592: arriba: Dr. Tony Brain/Science Source

657: fondo: Arriba Seller/Shutterstock

554: Paul G. Hewitt

593: Segre Collection/AIP/Science Source

657: foto: Paul G. Hewitt

556: Paul G. Hewitt

595: Bain Collection, Prints & Photographs 658: foto 1: Paul G. Hewitt 557: Diane Schiumo Hirsch/Fundamental

Division, Library of Congress, LC-

658: foto 2: AP Images

Photographs

DIG-ggbain-35303

658: foto 3: Paul G. Hewitt

562: foto 1: Paul G. Hewitt

596: izquierda: InFocus/Alamy

674: Mark Paternostro/John F. Kennedy

562: foto 2: Neil deGrasse Tyson/Paul G.

596: derecha: National Oceanic and Atmos-

Space Center/NASA

Hewitt

pheric Administration

677: Science Source

562: fotos 3–4: Pat Hall, City College of

601: fondo: Top Seller/Shutterstock

678: Gilles Paire/Fotolia

San Francisco/Paul G. Hewitt

601: foto: Alan Davis/Paul G. Hewitt

686: foto 1: Paul G. Hewitt

562: foto 5: Per Olaf Zetterberg/Paul G.

602: fotos 1–2: Paul G. Hewitt

686: foto 2: Lillian Lee Hewitt

Hewitt

602: foto 3: Dean Zollman/Paul G. Hewitt

686: foto 3: NASA Images

563: arriba izquierda: David Farrell/Getty

602: foto 4: Art Hobson/Paul G. Hewitt

686: foto 4: Paul G. Hewitt

Images

603: arriba: TopFoto/The Image Works

687: Library of Congress Prints and

563: abajo izquierda: Hulton Archive/Getty 603: abajo: Library of Congress Photographers Division

Images

Prints and Photographs Division

705: Paul G. Hewitt

563: derecha: Neil deGrasse Tyson/Paul G.

Washington[LC-DIG-ggbain-36570]

Hewitt

Índice

A

Aislantes, 303-304, 310, 412

modelo (planetario) de Bohr,

Bragg, William Lawrence, 228

Aberración, 537

Alas, flujo de aire alrededor, 274

213, 215, 607-608

Brahe, Ticho, 196

Aberración cromática, 537

Alimentos, irradiación de, 618, 632

movimiento browniano y, 210

Brand, Howie, 96

Aberración esférica, 537

Altímetros, 269

movimiento de, 209, 210, 211

Brazo de palanca, momento de

Aceleración, 43-46

Altura, 376, 393

temperatura y, 286-287

torsión y, 139

caída libre y, 46-50, 64-65

Alumbrado público, excitación y, 565

neutrones en, 213-214, 218,

Bronowski, Jacob, 563

caída no libre y, 65-67

AM, señales de radio, 386, 548

408-410

Brown, Robert, 210

centrífuga, 149

Ampere, 432

protones en, 213-214, 218,

centrípeta, 134

Ampere, Andre Marie, 453

408-410

C

de la Tierra, 79

Amperímetro, 461

tamaño de, 210

definición de, 43

Amplitud, de onda, 359

relativo, 215-217

Caída libre, 46-50, 64-65

fricción y, 59-61

Análisis de Fourier, 392, 397-399

Aurora austral, 276, 464, 565

Calentamiento. Véase también

fuerza neta y, 58-59, 63-64

Análisis de movimiento, 49

Aurora boreal, 464, 565

Transferencia de calor

fuerza y, 58-59

Anderson, Carl, 680

Autoinducción, 478

a partir de condensación, 323

gravedad y, 46-47, 64-65

Ángulo crítico, 531-533

Aviones

adiabático, 341-343

impulso y, 92-95

Ángulo de ataque, 274-275

estampido sónico de, 367-368

Calentamiento global, 313-314

inercia y, 58, 64-65

Anillos de Newton, 553, 584

flujo de aire alrededor de las

Calidad, de sonido, 395

ley de, 58, 63-64, 85

Animal, tamaño frente a fuerza de,

alas, 274

Calor, 287-295

masa y, 61-63, 65, 79-81

237-239

supersónicos, 367

definición de, 287

peso y, 61-63

Antenas, fractal, 490

específico, 289-291

principio de equivalencia y, 689

Antenas fractales, 490

B

expansión térmica y, 291-296

resistencia del aire y, 64-67

Antigua Grecia, ciencia en, 3-6

latente

sobre planos inclinados, 23-25,

Antimateria, 221-222

Bacon, Francis, 8

de fusión, 330

45-46

Antinodos, de ondas estacionarias,

Bacterias, magnetismo en, 465

de vaporización, 330-331

tangencial, 134

364

Baird, Dean, 321

medición de, 289

velocidad y, 43-46, 50

Antipartículas, 680

Balanceo de balde con agua, 146

procesos adiabáticos y, 341-343

Aceleración centrífuga, 149

Apogeo, 198

Balmer, Johann, Jakob, 606-607

unidades de, 289

Aceleración centrípeta, 134

Arcoíris, 529-530

Barómetro aneroide, 269

Calor latente

Aceleración tangencial, 134

Área superficial, escalamiento y,

Barómetros, 268-269

de fusión, 330

Actitud científica, 8-12

236-239

Barrera del sonido, 367, 368

de vaporización, 330-331

Acústica, 380

Área, superficie, escalamiento y,

Bastones, retina, 496-497

Caloría (energía de alimento), 289

Adams, J. C., 175

236-239

Baterías, 432

Caloría (energía térmica), 289

Adhesión, 258

Aristarco, 4-7

capacitores y, 423

Calórico, 339

Adición

Aristóteles, 9, 23, 209

Batimientos, 385-387

Cámara de burbujas, 627

de vectores, 28-29

teoría del movimiento, 21-22,

Becquerel, Henri, 616, 617

Cámara de chispas, 627

de velocidades, 673-675

23, 25, 34

Bell, Alexander Graham, 394

Cámara de serpentina, 627

ADN, daño inducido por radiación Armaduras, 462, 474-475

Bels, 394

Cámaras

de, 621

Armónico, 395

Big Bang, rayos cósmicos de, 464

estenopeica, 535

Agua. Véase también Líquido(s)

Arquímedes, 120

Bioluminiscencia, 572

lentes de, 535

capacidad calorífica específica

Arte, ciencia y, 12

Biomagnetismo, 465

Cámaras de niebla, 626-627, 630

de, 290-291

Astigmatismo, 537

Blindaje eléctrico, 419-420

Cámaras estenopeicas, 535

color de, 514-515

Astronautas. Véase Viaje espacial

Blomberg, Sara, 265

Cambio climático, 313-314

congelamiento de, 294-296,

Atardeceres

Bocinas, 378

Caminar sobre fuego, 303-304,

327-328

color de, 512-513

Bohr, Aage, 603

331

expansión de, 293-295

refracción y, 525-526

Bohr, Harald, 603

Campo gravitacional, 170-173,

pesada, 642

Aterrizado, 414, 436

Bohr, Niels, 595-596, 603, 638

417

transparencia de, 514-515

Aterrizado, enchufe eléctrico, 436

modelo atómico, 213, 215,

de Tierra, 170-173

Agua pesada, 642

Atmósfera, 265. Véase también Aire

607-608

del Sol, 173

Agujeros de gusano, 174

cambio climático y, 313-314

principio de correspondencia,

dentro de planeta, 171-173

Agujeros negros, 174-175

capas de, 265-266

611

Campos de fuerza, 171, 417

Aire

condensación en, 324-325

Bombas

eléctrico, 417-421

compresión del, 265

densidad del gas en, 265-266, 272

atómicas (fisión), 640-641, 651

gravitacional, 170-173, 417

convección en, 304-306

dimensiones de, 265-266

de hidrógeno (fusión), 220, 228

magnético, 171, 455-456, 462-

densidad del, 266-267

efecto invernadero y, 312-313

Bombas atómicas, 640-641, 651

464, 470-472, 475-478.

ley de Boyle y, 270-271

mareas en, 170

Bombas de fisión nuclear, 640-641,

Véase también Campo

flotabilidad del, 271-272

transparencia de, 493

651

magnético

líneas de corriente en, 274-275

Átomo(s), 209-218, 408-410

Bombas de hidrógeno, 651

Campos eléctricos, 417-421, 606

peso del, 266-267

características de, 210-211

Bombas de vacío, 269

blindaje de, 419-420

propiedades aislantes del, 304

cargado, 215-217, 410

Bombas térmicas, 328-329

campos magnéticos y, 455-456

saturado, 324

electrones en, 213, 408-410

Bosón de Higgs, 612

flujo de corriente y, 438-440

sonido en

estructura de, 213-214

Botes

Campos magnéticos, 171, 455-456

rapidez de, 378-379

excitación de, 564-566, 567

flotación de, 253-254

corriente eléctrica y, 455-456

transmisión del, 376-378

frente a elementos, 214

ondas de proa de, 367

de Tierra, 462-464

imágenes de, 212-213

Bragg, William Henry, 228

del Sol, 463

I-1

I-2

ÍNDICE

en inducción electromagnética,

Chinook, 342

Compresión, 232-233

líneas de campo eléctrico y,

470-472

Chispa, a partir de carga estática,

en arcos, 234-235

438-440

en transformadores, 475-478

410

en domos, 235

medición de, 461

Cantidad de movimiento, 90-108

Choque eléctrico, 435-436, 439

en transmisión del sonido, 377

propagación de, 438-440

angular, 150-152

Cielo, color de, 511-512

en vigas, 232-233

rapidez y fuente de electrones

conservación de, 151-152

Ciencia

Compuestos, 219

en, 438-440

aumento, 93

arte y, 12

Compuestos químicos, 219

Corrientes oceánicas, 343

como cantidad vectorial, 97

basura, 125

Condensación, 323-325

Corrimiento al azul, 366

conservación de, 97-103,

definición de, 4

en atmósfera, 324-325

Corrimiento al rojo, 366, 691-693

151-152

en antigua Grecia, 3-6

niebla y, 325

Corrimiento al rojo gravitacional,

ecuación relativista para, 681

física como fundamento de,

nubes y, 325

366, 691-693

en colisiones, 99-103

15-16

Conducción, 303-304, 432

Corrimientos de fase, interferencia

impulso y, 92-95

frente a pseudociencia, 13

transferencia de calor por, 315

de onda y, 552

lineal, 150

historia de, 4, 5

Conductores, 412-413

Cortocircuito, 445

rebote y, 96

marco temporal de, 16-17

Congelación, 294-296. Véase tam-

Coulomb, 411

reducción, 94-95

matemáticas y, 8

bién Hielo

Coulomb, Charles, 411, 453

relativista, 677-678

religión y, 12-14

ebullición y, 327

Crewe, Albert, 212

Cantidad de movimiento angular,

tecnología y, 14-15

fusión y, 327-328

Cristales, en filtros de polarización,

150-152

Ciencia basura, 125

rehielo y, 328

555-556

conservación de, 151-152

Cinturón de radiación Van Allen,

Conos, retina, 496-497, 508

Cristalino, 496

frente a cantidad de movimiento

464

Conservación de cantidad de movi-

Crookes, William, 605

lineal, 150

Circuito. Véase Circuitos eléctricos

miento, 97-103, 151-152

Cuantización, 584-585

Cantidad de movimiento lineal,

Circuito en serie, 441, 442-443

Conservación de cantidad de movi-

Cuantos, 410, 583

150

Circuitos eléctricos, 441-445

miento angular, 151-152

luz, 582-599

Cantidad de movimiento relativis-

en paralelo, 443-445

Conservación de carga, 409-410

Cuantos de luz. Véase Física cuántica

ta, 677-678

en serie, 441, 442-443

Conservación de energía, 117-120

Curie, Marie, 616, 617

Cantidad escalar, 28, 43, 51

fusibles para, 445

máquinas y, 120-121

Curie, Pierre, 616, 617

Cantidad vectorial, 28, 43, 51

sobrecarga en, 445

movimiento de satélites y,

Curva de radiación de luz solar,

Capa de electrones, 213, 409

Circuitos en paralelo, 443-444

197-198

508

Capa neutra, 232-233

sobrecarga en, 445

primera ley de termodinámica y,

Curva sinusoidal, 358

Capacidad calorífica, 289-291

Clima

340

del agua, 290-291

procesos adiabáticos y, 341

Constante de gravitación universal

Capacidad calorífica específica,

termodinámica y, 341-343

(G), 163-164

D

289-291

Código de Producto Universal

Constante de Planck, 564, 584-585

Dalton, John, 209-210

del agua, 290-291

(UPC), 577

Constante solar, 314

Darwin, Charles, 10

Capacitores, 423, 437-438

Cohen, Nathan, 490

Contacto, carga por, 413-414

Datación con carbono, 631-632

Capilaridad, 258

Cohesión, 258

Contador de centelleo, 627

Datación radiométrica, 630-633

Carbón, radiación proveniente de,

Colisiones

Contadores Geiger, 626

Davy, Humphrey, 470

619

cantidad de movimiento en,

Contaminación térmica, 345

De Broglie, Louis, 590-592, 609

Carga, 408-410

99-103

Contracción de la longitud, 675-677

Decaimiento radiactivo, 617, 625

conservación de, 409-410

elásticas, 99

Contracción de Lorentz, 676, 694

transmutación y, 628-630

cuantizada, 410

inelásticas, 99

Contraparte de Maxwell a la ley de

Decibeles, 394

efecto ámbar y, 604

Colisiones elásticas, 99

Faraday, 479-480, 607

Declinación magnética, 456-457

estática, 410

Colisiones inelásticas, 99

Convección, 304-306

Defectos de visión, 537

flujo de, 431-432. Véase también

Color(es), 504-518

transferencia de calor por, 315

Delfines, ecolocalización en, 387

Corriente eléctrica

complementario, 509

Copérnico, Nicolás, 5, 22, 33, 40

Densidad

unidad de, 411

de arcoíris, 529-530

Córnea, 496

de aire, 266-267

Carga eléctrica. Véase Carga

de atardeceres, 512-513

Corriente(s)

ley de Boyle y, 270-271

Carga estática, 410. Véase también

de nubes, 514

convección, 305-306

de gases, 267, 268

electrostática

de sombras, 509

eléctrica. Véase Corriente

de peso, 229-230

de generador Van de Graaff, 424

del agua, 514-515

eléctrica

de sólidos, 229-230

Cargar

del cielo, 511-512

océano, 343

flotar contra hundirse y,

por contacto, 413-414

dispersión y, 511, 515, 529-530

Corriente alterna (CA), 437-438,

251-255

por inducción, 414-415

excitación y, 565

453, 474

frente a presión, 270-271

Cataglyphis, adaptación al calor,

frecuencia de luz y, 505

Corriente directa (CD), 437-438,

Densidad de peso, 229-230

295

interferencia de, 553-554

453

Desaceleración, 44

Catalizador de aprendizaje, 161

iridiscencia y, 553-554

Corriente eléctrica, 430-451

Desastre nuclear en Chernobyl,

Catenarias, 234-235

mezclas de, 507, 509-511, 513

aislantes y, 412

642, 644

Cavendish, Henry, 163

primario, 508

alterna, 437-438, 453, 474

Desecho radiactivo, 645

CD, grabación de, 399-400

aditivo, 508

campos magnéticos y, 455-456,

Desechos nucleares, 645

Celdas de combustible, 124, 442

sustractivo, 510

458

Desiertos, adaptación a, 295

Celdas de combustible de hidróge-

reflexión selectiva y, 505-506

choque a partir de, 435-436, 439

Detectores de radiación, 626-628

no, 442

transmisión selectiva y, 507

conductores y, 412-413

Deuterio, fusión de, 650-652

Celdas fotovoltaicas, 124-315

Colores complementarios, 509

definición de, 432

Diamantes, ángulo crítico para,

Celsius, Anders, 286

Colores de interferencia, 553-554

directa, 437-438, 453

533

Centrífugas, 146

Colores primarios, 508

en galvanómetro, 461

Diferencia de potencial, 431

Centro de masa/gravedad, 140-145

sustractivos, 510

en motores eléctricos, 462

Difracción, 212, 547-548

definición de

Colores primarios aditivos, 508

flujo de carga y, 431-432, 438-

de electrones, 590-592

estabilidad y, 143

Colores primarios sustractivos, 510

440

de fotones, 590-592

ubicación, 141-142

Combustible de hidrógeno, 124

inducción de, 471, 472. Véase

Difracción de electrones, 590-592

Cero absoluto, 286, 337-339

Cometa Halley, 162

también Inducción electro-

Dilatación del tiempo, 663-673

CFL (lámparas fluorescentes com-

Complementariedad, 595-596

magnética

en problema de viaje de gemelos,

pactas), 441

Componentes, vector, 82-84

ley de Ohm y, 434-437

668-673

Í N D I C E

I-3

Diodos, 437, 573

Eje de rotación, 137-138

de satélite, 197-198

Energía oscura, 176, 222

emisores de luz, 441, 573-574

Ejes coordenados, 663

definición de, 113

Energía potencial, 113-114

Diodos emisores de luz (LED),

Elasticidad, 230-231

dispersión de, 347-350

de satélite, 197-198

441, 573-574

conducción de sonido y, 376

eficiencia y, 121-122

eléctrica, 421-422

Dipolos eléctricos, 417

Electricidad, 407-408

eléctrica

gravitacional, 113

Dirección

estática, 410. Véase también

potencial, 421-422

Energía potencial eléctrica,

vectores y, 28. Véase también

Electrostática de generador

producción de, 432, 473-475.

421-422

Vector(es)

Van de Graaff, 424

Véase también Inducción

Energía potencial gravitacional, 113

velocidad y, 42-43

magnetismo y, 455-456, 458-

electromagnética; Gene-

Energía radiante, 307-311

Discos láser, grabación de, 399-400

460

radores

absorción de, 309-310

Dispersión, 511, 515, 529-530

Electrodos, 475

en cambios de fase, 328-332

emisión de, 308-309

en diamantes, 533

Electroimanes, 459-460

en ondas sonoras, 379

reflexión de, 310

por rejillas de difracción, 551

Electrólisis, 124

en reposo, 678

solar, 308, 314-315. Véase tam-

Dispersión Rayleigh, 511

Electrón(es), 213

eólica, 124

bién Energía solar

Distancia

carga y, 408-410

fuentes de, 123-125

tipos de, 307

en caída libre, 48-49, 50

descubrimiento de, 604-606

geotérmica, 125

Energía reciclada, 119-120

gravedad y, 164-165

expulsión por luz, 585-587

interna, 287-288, 339, 340

Energía solar, 123, 314-315

rapidez y, 41-42

longitud de onda de, 590-591

procesos adiabáticos y,

como energía radiante, 308,

trabajo y, 111

magnetismo de espín de, 456

341-343

314-315

Disyuntores, 445

niveles de energía de, 564,

máquinas y, 120-121

en fotosíntesis, 221

Dobson, John, 679

607-608

masa, 339

Energía térmica, 287

Doherty, Paul, 75

notación para, 629

masa en reposo, 680

Enfriamiento. Véase también Trans-

Domos, 235

órbitas de, 607-609

masa y, 645-648, 678-680

ferencia de calor

Doppler, Christian, 366

radiación de energía de, 607-608

mecánica, 113

adiabático, 341-343

du Chatelet, Emilie, 110

vibración de, 489-490

medición de, incertidumbre

ley de Newton de, 311-312

Dualidad onda-partícula, 588

Electrones de conducción, 432

en, 594

por ebullición, 326-327

difracción de electrones y, 590-592

Electrón-volt, 639

nuclear

por evaporación, 321-323

en experimento de doble rendija, Electrostática, 406-429

fisión, 124, 644-645. Véase

por expansión, 305-306

549-550, 584, 588-590

aislantes y, 412

también Fisión nuclear

por radiación, 310-311

fotón, 591

campos eléctricos y, 417

formas de, 116-117

tasa de, 311-312

principio de incertidumbre y,

cargar y, 413-415

fusión, 652

Enlace atómico, 220, 228

592-595

cargas eléctricas y, 408-411

oscura, 176, 222

Enlaces covalentes, 220

DVD, grabación de, 399-400

conductores y, 412-413

potencia y, 112

Entropía, 348, 349-350

conservación de carga y, 409-

potencial, 113-114

Equilibrio

E

410

eléctrica, 421-422

de objetos en movimiento,

definición de, 407

gravitacional, 113

32-33

E = mc 2 (equivalencia masa-ener-

ley de Coulomb y, 411-412

radiante, 307-311, 314-315

definición de, 30

gía), 645-648, 678-680

polarización de carga y, 416-417

reciclada, 119-120

dinámico, 32, 33

Ebullición, 325-327. Véase también

potencial eléctrico y, 421

solar, 123

estático, 32, 33

Vapor de agua

Elementos, 214-218

como energía radiante, 308,

fuerza de sostén y, 32

congelación y, 327

definición de, 214

314-315

mecánico, 30, 32-33

géiseres y, 326

frente a átomos, 214

en fotosíntesis, 221

Equilibrio dinámico, 32-33

Eclipse lunar, 494

isótopos de, 218

tecnología y, 118

Equilibrio estático, 32, 33

Eclipse solar, 494

niveles de energía de, 564

teorema trabajo-energía y,

Equilibrio mecánico, 30, 32-33.

Ecolocalización, 381-382, 387

sintéticos, 630

115-117

Véase también Equilibrio

Ecos, 379

tabla periódica de, 215-218

térmica, 287

Equivalencia masa-energía (E =

Ecuación de Carnot, 345

transmutación de, 628-630. Véa-

trabajo y, 110-113

mc 2), 645-648, 678-680

Ecuación de lente delgado, 535

se también Transmutación

transformación de, 117-118

Era de la razón, 176

Ecuación de onda de Schrödinger,

Elementos sintéticos, 630

eficiencia y, 121-122

Eratóstenes, 3-4

610

Elipse, 194

Energía cinética, 114-115

Escala absoluta de temperatura

Edison, Thomas, 119-120, 452

Ellenstein, Marshall, 545

de satélite, 197-198

(Kelvin), 286, 338-339

Efecto ámbar, 604

Emisión de luz, 562-577

de traslación, 286-287

Escala Celsius, 286, 338-339

Efecto Doppler, 365-366, 569

espectros de, 566-567

en evaporación, 321-322

Escala de temperatura internacio-

Efecto fotoeléctrico, 585-587

espectros de absorción y, 569

rotacional, 286

nal, 286

Efecto invernadero, 312-313

excitación en, 564-566

temperatura y, 286-287

Escala Fahrenheit, 286, 338

Efecto Mössbauer, 692

fluorescencia y, 570-571

teorema trabajo-energía y,

Escala Kelvin, 286, 338-339

Efecto Purkinje, 497

frecuencia pico y, 568

115-117

Escalamiento, 236-239

Eficiencia, 121-122

incandescencia y, 567-568

vibratoria, 286

Escalas de temperatura, 286,

ideal, 345-347

láseres y, 574-577

Energía de enlace, 646, 648

338-339

Einstein, Albert, 10, 574

Enchufes aterrizados, 436

Energía de masa, 339

Escobillas, 462, 475

efecto fotoeléctrico y, 586-587, 603

Energía, 109-131. Véase también

Energía de masa en reposo, 680

Espacio exterior. Véase también Viaje

equivalencia masa-energía y,

Potencia de ser, 339

Energía eléctrica

espacial; Espacio-tiempo

645-648, 678-680

almacenamiento de, 423

almacenamiento de, 423

curvatura de, 695-696

movimiento browniano y,

cantidad frente a calidad de, 347

potencial, 421-422

temperatura de, 311

210, 586

cinética. Véase Energía cinética

producción de, 432, 473-475.

Espacio-tiempo

teoría cuántica y, 583, 584, 586,

conservación de, 117-120

Véase también Inducción

curvatura (deformación) de,

587, 603, 610

máquinas y, 120-121

electromagnética; Gene-

695-696

teoría de gravitación y, 173

movimiento de satélites y,

radores

dilatación del tiempo y, 663-668

teoría de la relatividad especial y,

197-198

Energía en reposo, 678

Espectro electromagnético, 408,

455-456, 658-685

primera ley de termodinámica Energía geotérmica, 125

489-490

teoría general de la relatividad y,

y, 340

Energía interna, 287-288, 339, 340

Espectrómetro de masa, 646

686-697

de enlace, 646, 648

procesos adiabáticos y, 341-343

en seguridad aeroportuaria, 649

vida de, 659, 687

de mareas, 124

Energía mecánica, 113

Espectrómetros, 551

I-4

ÍNDICE

Espectros atómicos, 222, 606-607

cuantización en, 584-585

Fricción, 59-61

energía cinética y, 115

Espectros de absorción, 569

difracción de electrones en,

carga por contacto y, 413-414

equilibrio y, 30, 32-33

Espectros de emisión, 566-567

590-592

conservación de cantidad de

presión de líquido y, 248-249

Espectroscopio, 566

dualidad onda-partícula en,

movimiento y, 100

Fuerza normal, 32

Espejismos, 526-527, 528

586-588. Véase también

deslizamiento, 60

Fuerzas de acción y reacción

Espejos, 522-523

Dualidad onda-partícula

energía cinética y, 116

con diferentes masas, 79-81

Espejos planos, 522-523

efecto fotoeléctrico en, 585-587

estática, 60

ley de, 76-85

Estabilidad, 143

experimento de doble rendija en,

fluido, 60

vectores y, 76-79

Estación Espacial Internacional.

549-550, 584, 588-590

inercia y, 24-25

Fuerzas eléctricas, 408-411

Véase Viaje espacial

principio de incertidumbre en,

resistencia del aire y, 60

ley de Coulomb y, 411-412

Estados cuánticos

592-595

Fricción estática, 60

medición de, 461

definición de, 564

sistemas caóticos en, 596

Frío, adaptación a, 294-296

Fuerzas interplanetarias, 175-176

excitación en, 564-565

Física de bola de billar, 322

Frisch, Otto, 638

Fukushima, desastre nuclear, 642

Estados de energía discretos, 564

Fisión. Véase Fisión nuclear

Fuente, Carles, 490

Fulcro, 120

Estampido sónico, 367-368

Fisión nuclear, 616-636, 639-649

Fuerza(s), 28, 58

Función de densidad de probabili-

Estereogramas, 558-559

espontánea, 639

acción-reacción

dad, 610

Estrellas colapsadas, agujeros ne-

frente a fusión nuclear, 650-651

con diferentes masas, 79-81

Función de onda, 610

gros a partir de, 174-175

ganancia en energía a partir de,

ley de, 76-85

Función de trabajo, 587

Estructuras cristalinas, 227-229

646-648

vectores y, 76-79

Fundamental, frecuencia, 395

Evaporación, 321-323

inducida, 639

aceleración y, 58-59, 63-64

Fusibles, seguridad, 445

condensación y, 323

masa crítica en, 640

aparente, 148

Fusión

Excitación atómica, 564-566, 567

perspectiva histórica acerca de,

centrífuga, 147-150

calor latente de, 330

fluorescencia y, 570-571

638

centrípeta, 145-146

nuclear, 649-652

fosforescencia y, 571-572

reacción en cadena en, 639-640

de flotación, 249, 250-251

termonuclear, 118, 213, 650

láseres y, 575

FitzGerald, George F., 660-661,

débil, 411

Fusión (fundido), 294, 327-328

Expansión térmica, 291-296

676

eléctrica, 408-412

rehielo y, 328

Experimento de doble rendija, 549-

Flotabilidad

ley de Coulomb y, 411-412

Fusión de hidrógeno, 650-652

550, 584, 588-590

en aire, 271-272

medición de, 461

Fusión nuclear, 649-652

Experimento Michelson-Morley,

en líquido, 249-250

en interacciones, 75-76

Fusión termonuclear, 118, 213,

660-661

principio de Arquímedes y,

en sistema, 77-78

650

Exploratorium, 75, 357

250-251

ficticia, 148

Extremos ambientales, adapta -

Flotación, 251-255

frente a momento de torsión, 139

ción a, 295

Fluido(s), 60. Véase también

frente a presión, 245-246

G

Gas(es); Líquido(s)

fuerte, 622-624

g (aceleración debida a la grave-

F

convección en, 304-306

impulso y, 92-95

dad), 64-65

líneas de corriente en, 273

inercial, 148

G (constante gravitacional univer-

Fabricación aditiva, 235

Flujo

interplanetaria, 175-176

sal), 64-65

Factor de enfriamiento del viento,

rapidez de fluido y, 272-275

magnética, 454, 460-462

Gabor, Dennis, 559

312

remolinos en, 274

máquinas y, 120-121

Gafas, 537. Véase también Lentes

Factor de Lorentz, 666, 677

turbulento, 274

movimiento y, 28-30

índice de refracción de, 526

Factores de conversión, 680

Flujo de aire, presión y, 272-275

neta. Véase Fuerza neta

Galileo Galilei, 8, 9, 24, 34, 40,

Fahrenheit, Gabriel Daniel, 286

Flujo laminar, 273-274

normal, 32

58, 64, 197, 285

Falkirk Wheel, 253

Flujo turbulento, 274

sobre diferentes masas, 79-81

experimentos con planos incli-

Farad, 470

Fluorescencia, 570-571

sostén, 32

nados, 23-25, 45-46

Faraday, Michael, 470, 474

FM, señales de radio, 386, 548

trabajo y, 111

medición de rapidez por, 41

Fases de la materia, 321

Ford, Kenneth W., 375

unidades de, 27, 30

rapidez de objetos en caída y, 23

cambios de, energía requerida

Fosforescencia, 571-572

vectores y, 28-29. Véase también

teoría copernicana y, 5, 40

para, 328-332

Fotografía

Vector(es)

teoría de Aristóteles y, 23, 25,

condensación, 323-325

cámaras estenopeicas y, 535

Fuerza centrífuga, 147-150

34, 40

congelación, 294-296, 327-328

exposición a luz en, 588

en marco de referencia giratorio,

teoría de inercia, 23-25, 26

ebullición, 325-327

Fotones, 564-565, 583-588. Véase

147-148

vida de, 40

evaporación, 321-323

también Dualidad onda-

gravedad simulada y, 148-149

Galvani, Luigi, 461

fusión, 294, 327-328

partícula

Fuerza centrípeta, 145-146

Galvanómetro, 461

rehielo, 328

difracción de, 590-592

Fuerza de flotación, 249, 250-251

Gases nobles, 215

sublimación, 322

Fotosíntesis, 220-221

Fuerza de reacción. Véase Fuerzas

Gases, 264-282, 321. Véase también

Fermat, Pierre de, 520

Fourier, Jean Baptiste Joseph, 392,

acción-reacción

Fases de la materia. Véase

Fermi, Enrico, 638, 641

398

Fuerza de sostén, 32

Atmósfera, condensación

Feynman, Richard, 209, 221, 222

Fóvea, 496

Fuerza débil, 411

en, 323-325

Fibras ópticas, reflexión interna

Franjas de difracción, 547, 550-551

Fuerza, escalamiento y, 236-239

conducción de sonido en, 376

total en, 533

Franklin, Benjamín, 407, 415,

Fuerza ficticia, 148

convección en, 304-306

Filtros, Polaroid, 555-556, 558

604-605

Fuerza fuerte, 622-624

densidad de, 267, 268

Física

Fraunhofer, Joseph von, 569

Fuerza inercial, 148

efecto invernadero, 313

atómica, 602-614

Frecuencia

Fuerza magnética, 454

electrificados, 276

bola de billar, 322

de onda, 359

galvanómetro y, 461

expansión de, 265

como la ciencia básica, 15-16

fundamental, 395

motores eléctricos y, 462

frente a plasmas, 276

cuántica, 582-599. Véase tam-

natural, 382

sobre alambres portadores de

nobles, 215

bién Física cuántica

pico, 568

corriente, 460-461

presión de, principio de Pascal y,

nuclear, 616-636

Frecuencia modulada (FM), señales

sobre partículas cargadas en

255-256

Física atómica, 602-614

de radio, 386

movimiento, 460

Géiseres, 326

Física cuántica, 584

Frecuencia natural, 382

Fuerza neta, 28, 58-59

Gell-Mann, Murray, 622

complementariedad en, 595-596

Frecuencia pico, 568

aceleración y, 58-59, 63-64

Generador van de Graaff, 424, 431

constante de Planck en, 564,

Frentes de onda, 527-528, 545-547

en segunda ley de Newton,

Generadores, 432, 473-475

584-585

Fresco, Jacque, 133

63-64

MHD, 277, 475

Í N D I C E

I-5

turbogeneradores, 474-475

Henry, Joseph, 470, 474

Instrumentos de percusión, 396,

Láser(es), 574-577

Van de Graaff, 424, 431

Hertz (Hz), 359

397

hologramas y, 559, 575

Generadores eléctricos, 432, 473-

Hertz, Heinrich, 359, 584

Instrumentos de viento, 396

Láser helio-neón, 576, 577

475

Hibridación solar, 123

Instrumentos musicales, 396-397

LASIK, 537

Generadores magnetohidrodinámi-

Hidráulica, 256

Instrumentos musicales electróni-

Laue, Max von, 227-228

cos, 277, 475

Hidrógeno, 214, 215

cos, 397

LED (diodo emisor de luz), 441,

Generadores MHD, 277, 475

espectros atómicos de, 606

Interferencia, 363-364, 384-387,

573-574

Geodésica, 695

Hielo, 294-296

549-554, 587

Lente

Geometría

formación de, 327-328. Véase

batimientos e, 385-387

acromática, 537

euclidiana, 695

también Congelación

constructiva, 363, 384

anillos de Newton en, 553

para teoría de la relatividad

fusión de, 294, 327-328

corrimientos de fase e, 552

cámara, 535

general, 694-696

sublimación de, 322

destructiva, 363, 384, 385

convergente, 533-534, 535-536

Geometría euclidiana, 695

Hierro, dominios magnéticos en,
en experimento de doble rendija,
correctivo, 537
Gilbert, William, 453, 604
456-457. Véase también
549-550, 584, 588-590
de lupa, 536
Globos de helio, 271-272
Magnetismo
hologramas e, 559
defectos en, 537
Globos de hidrógeno, 272
Higgs, Peter, 612
ondas de electrones e, 608-610
divergente, 534, 536
Globos, flotabilidad de, 271-272
Hipótesis atómica, 209-210
ondas de luz e, 549-554
eje principal de, 534
Grabación analógica, 399-400
Hipótesis, puesta a prueba de,
ondas estacionarias e, 364-365
formación de imagen por,
Grabación de sonido, analógico

9-12

ondas sonoras e, 384-385

534-536

frente a digital, 399-400

Hologramas, 559, 575

película delgada, 552-554

imágenes reales y, 536

Grabación digital, 399-400

Hooke, Robert, 231, 270

un solo color, 552-553

imágenes virtuales y, 536

Grabaciones, analógicas frente a

Hormigas

Interferencia constructiva, 363, 384

índice de refracción de, 526

digitales, 399-400

adaptación al calor, 295

batimientos e, 385-387

longitud focal de, 534

Gran Colisionador de Hadrones,

tamaño frente a fuerza de, 237

Interferencia de película delgada,

plano focal de, 534

460, 612

Hornos de microondas, 418

552-554

punto focal de, 534

Gravedad, 160-181

Hubisz, John, 227

un solo color, 552-553

refracción en, 533-534

aceleración debida a, 46-47,

Hubisz, Jola, 227

Interferencia destructiva, 363,

Lente acromático, 537

64-65

Humedad, 323, 324

384, 385

Lentes convergentes, 533-534,

agujeros negros y, 174-175

Humedad relativa, 324

batimientos e, 385-387

535-536

antimateria y, 221-222

Humor vítreo, 496

Interferómetros, 554, 660

Lentes correctivos, 537

caída libre y, 64-65

Hundimiento, 251-252

Inversión de tiempo, 674-675

Lentes de contacto, 537

centro de, 140-145

Huygens, Christian, 545-547, 584

Inversiones de temperatura, 342

Lentes divergentes, 534, 536

estabilidad y, 143

Iones, 215-217, 276, 410

Leverrier, Urbain, 175

ubicación, 141-142

Iones negativos, 276, 410

Ley(es). Véase también Principio(s)

distancia y, 164-165

I

Iones positivos, 276, 410

de acción-reacción, 76-85

doblamiento de luz por, 689-

Icebergs, flotación de, 254

Ionización, 626

de aceleración, 58, 64-65, 85

691

Ilusiones ópticas, 498, 499

Iridiscencia, 553-554

de Boyle, 270-271

ingravidez y, 166-167

Imagen real, 536

Iris, 496, 497

de conservación, 98

ley de gravitación universal y,

Imagen virtual, 522, 536

Isótopos, 218

de conservación de cantidad

161-165, 176, 411, 694,

Impresión 3D, 235

Isótopos radiactivos, 621-622

de movimiento, 97-103,

695

Impresoras a color, 510-511

151-152

ley del inverso al cuadrado y,

Impulso, 92-95

de conservación de cantidad

164-165

cambio en cantidad de movi-

J

de movimiento angular,

mareas y, 167-170

miento e, 93-95

Jets. Véase Aviones

151-152

masa y, 62

Incandescencia, 567-568

Joule, 111, 289

de conservación de carga,

movimiento de proyectiles y,

espectros de absorción y, 569

Juntas de expansión, 292

409-410

183-189

Inducción, carga por, 414-415

de conservación de energía,

peso y, 62, 166-167

Inducción de campo, 479-480

117-118

rapidez de escape y, 174, 198-

Inducción electromagnética, 469

K

máquinas y, 120-121

200

aplicaciones de, 471

Kelvin, Lord, 3, 337

primera ley de la termodiná-

simulada, 148-149

autoinducción, 478

Kepler, Johannes, 196-197

mica y, 339-343

Gravedad simulada, 148-149

ciclo de, 473-474

Kilocaloría, 289

de Coulomb, 411-412, 454

Gravitación

definición de, 470

Kilogramo (kg), 62

de enfriamiento, 311-312

ley de Newton de, 161-165,

generadores e, 473-475

Kilowatt (kW), 112

de Faraday, 472, 479

176, 411, 694, 697

inducción de campo, 479-480

contraparte de Maxwell a,

principio de equivalencia y, 689

ley de Faraday y, 472

479-480

teoría de Einstein, 173

transformadores e, 475-478

L

de gravitación universal, 161-

teoría de la relatividad general y,

transmisión de potencia e, 479

Lámparas, 441

165, 176, 411, 694, 697

686-697

Inercia

color y, 506

de Hooke, 231

Gravitación universal, 175-176

aceleración e, 64-65

de calle, excitación y, 565

de inercia, 26, 30-31, 34, 85

ley de, 161-165, 176, 411, 694,

concepto de Galileo de, 23-25, 26

fluorescentes, 506, 572-573

de Lenz, 478

697

definición de, 25

compactas, 441, 573

de movimiento

Grecia, antigua, ciencia en, 3-6

fricción e, 24-25

plasma en, 276

primera de Newton, 26, 30-

Grey, Burl, 27, 133

ley de, 26, 30-31, 34, 85

incandescentes, 572

31, 34, 85

momento de, 136

Lámparas de vapor de mercurio, 565

segunda de Newton, 58,

H

movimiento de la Tierra e, 33-34

Lámparas eléctricas. Véase Lámparas

63-64, 85

rotacional, 136-139

Lámparas fluorescentes, 506,

tercera de Newton, 76-85

Hahn, Otto, 638

Inercia rotacional, 136-139

572-573

de movimiento planetario,

Halley, Edmund, 162

Ingravidez, 166-167

compactas, 441, 573

196-197

Hechos, 8

Inhibición lateral, 498

plasma en, 276

de Ohm, 434-437

Heisenberg, Werner, 593-594

Insectos, magnetismo en, 465

Lámparas fluorescentes compactas

de reflexión, 521-522

Helio, 214, 215, 217

Instrucción por pares (Mazur), 161

(CFL), 441, 573

de Snell, 526

descubrimiento de, 569

Instrumentos de cuerda, 396

Lámparas incandescentes, 572

de termodinámica

I-6

ÍNDICE

cero, 350

Lorentz, Hendrik A., 660, 676

Luz solar, curva de radiación de,

Mazur, Eric, 161

primera, 339-343, 349-350

Luces. Véase Lámparas

508

Meadows, Roxanne, 133

segunda, 344-347, 349-350

Luces del norte, 464, 565

Luz ultravioleta, 493

Mecánica cuántica, 583, 610-611

tercera, 350

Luna

fluorescencia y, 570-571

Mediciones, 3-8

definición de, 8

campo gravitacional de la Tierra

opacidad a, 493

incertidumbre de, 592-595

inverso al cuadrado, 164-165

y, 161, 170-173

transparencia a, 493

marco de referencia para, 659-

Ley cero de la termodinámica, 350

distancia desde la Tierra, 5, 152

665. Véase también Teoría

Ley de Boyle, 270-271

eclipse de, 494

de la relatividad especial

Ley de Coulomb, 411-412, 454

mareas en, 170

M

Mediciones científicas, 3-8

Ley de cuadrado inverso, 164-165

movimiento de, 191

Mácula, 496

incertidumbre de, 592-595

Ley de Faraday, 472, 479

órbita de, 161

Magnetismo, 452-468

marco de referencia para, 659-

contraparte de Maxwell a, 479-

tamaño de, 4-5

electricidad y, 455-456, 458-460

65. Véase también Teoría de

480, 607

Lupa, 536

electroimanes y, 459-460. Véase

la relatividad especial

Ley de Hooke, 231

Luz. Véase también Ondas electro-

también Espectro electro-

Medidores eléctricos, 461

Ley de Lenz, 478

magnéticas

magnético

Meitner, Lise, 638

Ley de Ohm, 434-437

absorción de, 506

en organismos vivientes, 465

Meitnerio, 638

choque eléctrico y, 435-436

blanca, 508

motores eléctricos y, 462

Mendeleev, Dmitri, 215

Ley de Snell, 526

brillantez de, inhibición lateral

primeros estudios de, 453

Mercurio (elemento)

Leyes de conservación, 98

y, 498

Magnetita, 465

en barómetro, 268

Leyes de movimiento de Newton

coherente, 574-575

Máquinas, 120-121

en lámparas fluorescentes com-

primera, 26, 30, 31-32, 34, 85

color y, 505-518

eficiencia de, 121-122

pactas, 441

segunda, 58, 63-64, 85

como radiación electromagné-

ideales, 121

en termómetros, 285-286

tercera, 76-85

tica, 488. Véase también

Máquinas térmicas, 344-347

Mercurio (planeta), órbita de, 694

con diferentes masas, 79-81

Espectro electromagnético

Marco de referencia, 659-662.

Metales

vectores y, 82-85

difracción de, 212, 547-548.

Véase también Teoría de la

conducción de calor por, 303-

Libro: ¿Está usted de broma, Sr.

Véase también Difracción

relatividad especial

304

Feynman? , 209

dispersión de, 511, 515, 529-530

dilatación de tiempo y, 664-668

estructura cristalina de, 227-228

Lim, Tenny, 183

en diamantes, 533

giratorio, fuerza centrífuga en,

opacidad de, 493

Linder, Anne, 20, 21

por rejilla de difracción, 551

147-148

Meteorología, termodinámica y,

Linder, Cedric, 20, 21

doblamiento por gravedad,

simultaneidad y, 662-663

341-343

Líneas de absorción, 569

689-691

Marco de referencia giratorio, fuer-

Método científico, 8-12

Líneas de corriente, 273, 275

estudios de Newton de, 505,

za centrífuga en, 147-148

Mezclas, 219

Líneas de Fraunhofer, 569

553, 584

Mareas

Michelson, A. A., 660-661

Líneas de fuerza, 419

fluorescente, 276, 441, 570-573

atmosféricas, 170

Microscopio de efecto túnel,

Líneas espectrales, 566

fotones y, 564-565, 583-588.

lunares, 170

212-213

Líquido(s), 244-263, 321. Véase

Véase también Dualidad

oceánicas. Véase Mareas oceánicas

Microscopio electrónico de

también Fases de la mate-

onda-partícula

terrestres, 170

barrido, 212

ria; Agua

frecuencia de, 489-490

Mareas muertas, 169

Microscopios

capilaridad y, 258

incandescente, 567-569, 572

Mareas oceánicas, 167-170

de efecto túnel, 212-213

condensación y, 323-325

incoherente, 574-575

como fuente de energía, 124

electrónicos, 212, 548, 591-592

conducción de sonido en, 376

láser, 559, 574-577

gravedad y, 167-170

electrónicos de barrido, 212

congelación de, 294-296,

modelo de resorte de, 491

muertas, 169

Microscopios electrónicos, 212,

327-328

opacidad a, 493

vivas, 168-169

548, 591-592

convección en, 304-306

polarizada, 555-557, 558

Mareas vivas, 168-169

Milirem, 620

desplazamiento de, 249-251

rapidez de, 488, 524

Masa, 58, 61-63

Millikan, Robert, 605-606

ebullición de, 325-327

a través de diferentes materia-

aceleración y, 61-63, 65, 79-81

Mitchell, John, 453

evaporación de, 321-323

les, 492

atómica, 218

Modelo de resorte de la luz, 491

expansión de, 293-295

en teoría de la relatividad

caída libre y, 65

Modelo planetario del átomo, 213,

expansión térmica en, 292-295

especial, 661-662

centro de, 140-141. Véase también

215, 607-608

flotabilidad y, 249-251

reflexión interna total y,

Centro de masa/gravedad

Moléculas, 220-221

flotar frente a hundirse en,

531-533

como energía condensada, 645-

movimiento de, temperatura y,

251-255

refracción y, 524-528

648, 678-680

286-287

líneas de corriente en, 273, 275

reflexión de. Véase Reflexión

crítica, en fisión nuclear, 640

Momento de inercia, 136

presión de, 246-249

de luz

frente a peso, 61

Momento de torsión, 136, 139-

principio de Pascal y, 255-256

refracción de, 524-526

frente a volumen, 62

140, 144

rapidez y, 272-275

teoría corpuscular de, 505, 553,

gravedad y, 62

Momento de torsión neto, 140

principio de Arquímedes y,

584, 587

nuclear, número atómico y,

Montañas, flotación de, 254

250-251

teoría ondulatoria de, 545-

646-647

Morley, E. W., 660-661

rapidez de flujo de, 272-275

547, 584, 586-587. Véase

segunda ley de Newton y, 63-64

Motores

tensión superficial de, 257-258

también Dualidad onda-

tercera ley de Newton y, 79-81

eléctricos, 462

Locke, John, 176

partícula

Masa atómica, 218

frente a generadores, 473

Longitud de onda, 359

transparencia a, 312, 313,

Masa crítica, en fisión nuclear, 640

Motores eléctricos, 462

de De Broglie, 590-592, 609,

491-493

Masa por nucleón, 647-648

Movimiento

612

ultravioleta, 493

Masa promedio por nucleón,

armónico simple, 358

de ondas longitudinales, 362

fluorescencia y, 570-571

647-648

browniano, 210

de radiación, 307

opacidad a, 493

Matemáticas, ciencia y, 8

de átomos, 209, 210, 211

efecto invernadero y, 312-313

transparencia a, 493

Materia

temperatura y, 286-287

transparencia y, 312, 313

visión y, 496-498

fases de. Véase Fases de la materia

dilatación del tiempo y, 664-668

rapidez de onda y, 362

Luz artificial, 441

oscura, 176

equilibrio y, 32-33

Longitud de onda de De Broglie,

color y, 506

Materia oscura, 176, 222

fluido, 272-275

590-592, 609, 612

Luz blanca, 508

Maxwell, James Clerk, 479, 487,

fuerza y, 28-30

Longitud, ecuación de relatividad

Luz coherente, 574-575

584, 659

leyes de Newton de

para, 681

Luz incoherente, 574-575

Maynez, Will, 20, 100

primera, 26, 30-31, 34, 85

segunda, 58, 64-65, 85

Neptuno, descubrimiento de, 175

gravitacional, 696

circular, 192-193, 197

tercera, 76-85

Nervio óptico, 496

infrarroja, 492

conservación de energía y,

marco de referencia para,

Neutrino, 628

interferencia de, 363-364,

197-198

659-662. Véase también

Neutrones, 213-214, 218. Véase

384-387, 549-554. Véase

de Luna, 161

Marco de referencia

también Nucleones

también Interferencia

de planetas, 5, 22, 196-197, 694

naturaleza relativista de, 40,

carga y, 408-410

longitudinal, 361-362, 555

electrónica, 409, 607-609

659-661. Véase también

en fisión nuclear, 630-640

luz. Véase Ondas de luz

elíptica, 194-195, 198

Teoría de la relatividad

fuerza fuerte y, 622-624

movimiento de pulso y, 376-377

Orbital, 409

general; Teoría de la relati-

Newton (N), 27, 30, 62

periodo de, 359

Órbitas circulares, 192-193, 197

vidad especial

Newton, Isaac, 25, 161-162, 231,

plano-polarizada, 555

Órbitas elípticas, 194-195, 198

onda, 360-365

505, 537

principio de Huygens y,

Oscilación, 506

percepción de, 497

estudio de luz, 505, 553, 584

545-547

Osciloscopio, 391, 392, 398

planetario, 5, 22, 196-197

ley de enfriamiento, 311-312

propiedades de, 358-360

Oxidación, 221

primera ley de Newton de, 26,

ley de gravitación universal, 161-

rapidez de, 362-363

30, 31-32, 34, 85

165, 176, 411, 694, 697

sonido. Véase Ondas sonoras

proyectiles. Véase Movimiento de

mareas oceánicas, 167

superposición de, 363, 398,

P

proyectiles

movimiento de satélites, 191

549-551

Palanca, 120

rotacional. Véase Movimiento

Principia Mathematica, 25, 26

transversal, 361-362, 555

eficiencia de, 121

rotacional

vida de, 58, 161-162

vibraciones y, 357. Véase también Parábola, 185

teoría aristotélica de, 21-22, 23,

Nitrógeno, transmutación de, 630

Vibraciones

arco como, 234-235

25, 34

Noddack, Ida, 638

Onda-partícula, 596-597

Paralaje, 557

teoría copernicana de, 5, 22

Nodos, de ondas estacionarias, 364

dualidad. Véase Dualidad onda-

Parcelas, adiabáticas, 341-343

teoría galileana de, 23-25, 34

Notas, musicales, 392

partícula

Pares de fuerzas, 76-79

transversal, 361

Nube(s), 325

Ondas de agua, 360

Pascal (Pa), 245

Movimiento armónico simple, 358

color de, 514

efecto Doppler y, 365-366

Pascal, Blaise, 245, 520

Movimiento browniano, 210, 586

Nubes de electrones, 609

interferencia de, 549

Patrones de difracción, 227-228

Movimiento de fluido, rapidez y,

Núcleo. Véase Núcleo atómico

Ondas de calor (infrarrojas),

Patrones de difracción de rayos X,

272-275

Núcleo atómico, 213-214, 409

489, 492

227-228

Movimiento de proyectiles, 183-205

componentes de, 622

Ondas de choque, 367-368

Patrones de interferencia, 363-364

componente horizontal de,

descubrimiento de, 603-604

Ondas de electrones, 608-610

holográfica, 559

183-185

energía de enlace de, 646

Ondas de luz, 545-561

Pauli, Wolfgang, 628

componente vertical de, 183-

fuerza fuerte y, 622-624

difracción de, 547-548

Péndulo, 358

185

masa por nucleón en, 647-648

efecto Doppler y, 366, 569

Penumbra, 494

con trayectoria angulada, 186-

niveles de energía en, 622,

hologramas y, 559

Penzias, Arno, 311

189

646-648

interferencia de, 549-551

Pérdida auditiva

con trayectoria horizontal,

tamaño de, 623-624

polarización de, 555-557, 558

inducida por ruido, 394-395

184-185

Nucleones, 213, 622

principio de Huygens y,

relacionada con la edad, 393

de satélites, 190-198. Véase

fuerza fuerte entre, 622-624

545-547

Perigeo, 198

también Satélite(s)

masa promedio por, 647-648

superposición de, 549-551

Periodo, de onda, 359

rango horizontal y, 188-189

quarks en, 622

visión 3D y, 557-558

Perrin, Francis, 640

rapidez de escape y, 198-200

Número atómico, masa nuclear y,

Ondas de materia, 609, 610

Perturbaciones, 175

rapidez de lanzamiento y, 188-189

646-647

Ondas de proa, 367

Peso, 61-63

trayectoria parabólica de, 185

Número de masa, 218

Ondas de radio, 379

del aire, 266-267

velocidad tangencial y, 191

Ondas electromagnéticas, 488-490.

escalamiento y, 236-239

Movimiento ondulatorio, 360-365

Véase también Luz

flotabilidad y, 249-250, 271-272

Movimiento rotacional, 132-159

O

energía radiante y, 307

flotar frente a hundirse y,

cantidad de movimiento angular

Objetos que caen

frecuencia de, 489-490

251-255

y, 150-152

distancia recorrida por, 48-49, 50

velocidad de, 488-489

frente a masa, 61

de ruedas de ferrocarril, 135

en caída libre, 46-50

Ondas estacionarias, 364-365

gravedad y, 62, 166-167

eje de, 137-138

rapidez de, 21, 23, 46-47, 50

Ondas gravitacionales, 696

Pichones, magnetismo en, 465

fuerza centrífuga y, 147-150

resistencia del aire y, 49

Ondas infrarrojas, 492

Piedras imán, 453

fuerza centrípeta y, 145-146

tercera ley de Newton y, 79-81

Ondas longitudinales, 361-362,

Pigmentos coloreados, mezclas de,

inercia rotacional y, 136-139

Oersted, Hans Christian, 453

555

509-511

momento de torsión y, 136,

Ohm (), 431, 434

Ondas P, 362

Pigmentos, mezclas de, 509-511

139-140, 144

Ohm, Georg Simon, 431, 434

Ondas plano-polarizadas, 555

Pila atómica, 642

movimiento circular y, 133-136

Ojo, estructuras de, 496

Ondas S, 362

Planck, Max, 583, 584, 638

rapidez rotacional y, 133-136

Ollas de presión, 325-326

Ondas sonoras, 375-378, 379

teoría cuántica de, 583-584, 586

rapidez tangencial y, 133-136

Onda(s), 357

batimientos y, 385-387

Planeta(s)

Muller, Derek, 91

amplitud de, 359

como ondas longitudinales, 362

bamboleo orbital en, 175

Musicales, instrumentos, 396-397

calor, 489, 492

difracción de, 547, 548. Véase

descubrimiento de, 175-176

Mutaciones, inducidas por radia-

curva sinusoidal y, 358

también Difracción

enanos, 175-176

ción, 621

de agua, 360, 365-366, 549

efecto Doppler y, 366, 569

fuerzas entre, 175-176

Myers, Fred, 452, 453

de choque, 367-368

energía en, 379

movimiento de 5, 22, 196-197,

de materia, 609, 610

infrasónicas, 376

694

N

de proa, 367

interferencia de, 384-385

rapidez de escape de, 198-200

de radio, 379

ultrasónicas, 376, 381-382

Planetas enanos, 175-176

Nanotecnología, 239

difracción de, 212, 547-548.

Ondas sonoras infrasónicas, 376

Planos inclinados, aceleración

Navegación animal

Véase también Difracción

Ondas sonoras ultrasónicas (ultra-

sobre, 23-25, 45-46

ecolocalización en, 381-382,

efecto Doppler y, 365-366

sonido), 376, 381-382

Plasma, 276-277, 321

387

electromagnética, 307, 488-490

Ondas transversales, 361-363, 555

Plutón, descubrimiento de,

magnetismo en, 465

electrón, 608-610

Opacidad, 493, 506

175-176

Neblina, 325

estacionaria, 364-365

Oppenheimer, Frank, 75, 357, 358

Plutonio, 643, 644

Neptunio, 643, 644

frecuencia de, 359

Órbita(s). Véase también Satélite(s)

Polarización, 555-557, 558

I-8

ÍNDICE

Polarización de carga, 416-417

de Bernoulli, 272-275

en seguridad alimentaria, 618, 632

Rayos cósmicos, 464

Polarización eléctrica, 416-417

de combinación de Ritz, 607

enfriamiento por, 310-311

Rayos de luz, 494

Poleas, 120-121

de correspondencia, 611-612,

frecuencia de, 307

Rayos (partículas) gamma,

Polipasto, 121

680-681

frecuencia pico de, 568

617-618, 622

Polonio, 616, 617

de equivalencia, 687-689, 692

fuentes de, 619

Rayos X, 616-617

Polos magnéticos, 454-455

de flotación, 253

gamma, 617-618, 622

en modelo atómico de Bohr, 608

de la Tierra, 462-463

de Huygens, 545-547

infrarroja, 308-309

Reacción en cadena, en fisión

Positrones, 221, 680

de incertidumbre, 592-595

ionización y, 626

nuclear, 639-640

Potasio, radiación interna de, 620

de Pascal, 255-256

longitud de onda de, 307

Reacción química, 221

Potencia, 112. Véase también

de superposición, 363, 398

efecto invernadero y, 312-313

Reacciones químicas, 221

Energía

de tiempo mínimo de Fermat,

transparencia y, 312, 313

Reactores

de mareas, 124

520-521

mutaciones por, 621

fisión, 641-645

definición de, 477

definición de, 8

terrestre, 308

reproductor, 644

eléctrica

Principio de Arquímedes, para aire,

transferencia de calor por, 307-

fusión, 652

almacenamiento de, 423

271-272

311, 315. Véase también

Reactores nucleares

producción de, 432, 473-475

Principio de Bernoulli, 272-275

Energía radiante

fisión, 641-645

eólica, 124

Principio de combinación de Ritz,

unidades de, 619-620

reproductor, 644

geotérmica, 125

607

Radiación de fondo, 311, 464, 619

fusión, 652

MHD, 277

Principio de correspondencia,

Radiación de fondo cósmico,

Reactores reproductores, 644

nuclear, 644-645

611-612, 680-681

311, 464, 619

Rebka, Glen, 692

fisión, 124, 644-645

Principio de equivalencia, 687-689, Radiación de microondas, 418, 585

Referencia, marco. Véase Marco de

solar, 314-315

692

Radiación electromagnética, luz

referencia

trabajo y, 112

Principio de Huygens, 545-547

como, 488

Reflexión

turbogenerador, 474-475

Principio de incertidumbre,

Radiación infrarroja, 308-309

de energía radiante, 310

unidad de, 112

592-595

Radiación terrestre, 308

de luz, 505-506, 520-524

vapor, 346-347

Principio de Pascal, 255-256

Radiactiva, vida media, 625

ángulo crítico y, 531-533

Potencia de cristal, 229

Principio de superposición,

Radiactividad, 617

arcoíris y, 529-530

Potencia de mareas, 124

363, 398

Radio, 616, 617

definición de, 520

Potencia de vapor, 346-347

Principio del tiempo mínimo de

Radón, 619

de sonido, 379-380, 506

Potencia eléctrica, 440

Fermat, 520-521

Rapidez, 41-42. Véase también

difusa, 523-524

producción de, 432, 473-475.

Prismas, 525

Velocidad

en espejos, 522-523

Véase también Generadores

reflexión interna total en, 532

angular, 133-134

en superficies pulidas, 523-524

transferencia de, 453, 475-478

PRK (queratectomía fotorrefracti-

como cantidad escalar, 43, 51

especular, 521

transmisión de, 479

va), 537

contra velocidad, 42-43, 51

interna total, 531-533

Potencia eólica, 124

Problema de viaje de los gemelos,

de escape, 174, 198-200

definición de, 520

Potencia geotérmica de piedra seca,

668-673

de lanzamiento, 189

ley de, 521-522

125

Procesos adiabáticos, 341

de luz. Véase Luz, rapidez de

Reflexión difusa, 523-524

Potencia MHD de metal líquido, 475

Propulsión de cohetes, 80. Véase

de objetos en caída, 21, 23,

Reflexión especular, 521

Potencia solar, 314-315

también Viaje espacial

46-47, 50

Reflexión interna total, 531-533

Potencial eléctrico, 422, 433

Protactinio, 629

de onda, 362-363

Refracción, 524-528

choque y, 435-436

Protones, 213-214, 218. Véase

definición de, 41

causa de, 527-528

frente a voltaje, 422, 433

también Nucleones

del sonido, 378-379

de sonido, 380-382

medición de, 461

campos magnéticos y, 465

distancia y, 41-42

definición de, 524

Pound, Robert, 692

carga y, 408-410

fluido, presión y, 272-275

en diamante, 533

Precesión, 694

en rayos cósmicos, 464

fricción y, 60

en lentes, 533-534

Precesión orbital, 694

fuerza fuerte y, 622-624

instantánea, 41, 46

espejismos y, 526-527, 528

Presión, 245-249

Proyectil(es), 183

lineal, 133

índice de, 526

atmosférica, 247, 265-266

satélites como, 190-198

medición de, 659-660

prismáticos, 525

medición de, 268-269

Proyecto Manhattan, 638, 640, 641

promedio, 41-42

Regla de equilibrio, 30, 33

definición de, 245

Pseudociencia, 13, 229

relativista, 664

Regla del paralelogramo, 29

estancamiento, 273

Pulso, movimiento de, 376-377

rotacional, 133-136

Rehielo, 328

frente a densidad, 270-271

Punto ciego, 496

tangencial, 133, 134

Rejilla de difracción, 551

frente a fuerza, 245-246

Pupila, de ojo, 496, 497-498, 537

terminal, 66

Relatividad. Véase Teoría de la

frente a volumen, 270-271

Pupilometría, 498

unidades de, 41

relatividad general; Teoría

líquido, 246-249

Rapidez angular, 133-134

de la relatividad especial

principio de Pascal y, 255-256

Rapidez de lanzamiento, 189

Religión, ciencia y, 12-14

total, 247

Q

Rapidez de onda, 362-363

Relojes

unidades de, 245

Quarks, 213, 622

Rapidez lineal, 133

corrimiento gravitacional al rojo

Presión atmosférica, 247, 266-269

Quásares, 175

Rapidez promedio, 41-42

y, 691-693

medición de, 268-269

Queratectomía fotorrefractiva

Rapidez tangencial, 133-134

dilatación del tiempo y, 664-667

unidades de, 268

(PRK), 537

Rapidez/velocidad de escape,

Relojes de luz, 664

Presión de agua, 246-249

Quintaesencia, 21

174, 198-200

Rem, 620

Presión de estancamiento, 273

Rapidez/velocidad instantánea,

Remolinos, 274

Presión de fluido

41, 46

Resistencia al deslizamiento, 60

principio de Pascal y, 255-256

R

Rapidez/velocidad terminal, 66

Resistencia del aire (arrastre aerodi-

rapidez y, 272-275

Rad, 619-620

Rarefacción, 362, 377

námico)

Presión del aire, 266-267

Radiación

Rassool, Roger, 627

aceleración y, 64-67

Principia Mathematica (Newton),

ambiental, 619-622

Rayo, 494

caída libre y, 60

25, 26

daño celular por, 620-621

Rayos (partículas) alfa, 603-604,

rapidez de un objeto que cae

Principio(s). Véase también Ley(es)

de fondo cósmico, 311,

617-618, 624

y, 49

de Arquímedes

464, 619

en transmutación, 628-630

Resistencia eléctrica, 433-434

para aire, 271-272

de microondas, 418, 585

Rayos (partículas) beta, 617-618, 624

ley de Ohm y, 434-437

para líquidos, 250-251

dosis de, 620-621

en transmutación, 628-639

unidad de, 431, 434

Í N D I C E

I-9

Resonancia, 382-383

elasticidad de, 230-231

condensación y, 324-325

Terapia de radiación, 620-621

Resonancia magnética, 465

escalamiento de, 236-239

presión y, 341-343

Térmicas, máquinas, 344-347

Resultantes, 28-29

estructura cristalina de, 227-229

cero absoluto, 286, 337-339

Termodinámica, 336-353

Reverberaciones, 380

expansión térmica en, 292

de espacio exterior, 311

cero absoluto y, 337-339

Ritz, Walter, 607

fusión de, 294, 327-328

energía cinética y, 286-287

conservación de energía y,

Roentgen, Wilhelm, 616-617

tensión en, 232-235

energía interna y, 287-288,

339-343

Rueda Pelton, 96

Sólidos amorfos, 228

339, 340

definición de, 336

Ruedas de ferrocarril, movimiento

Sombras, 494-495

movimiento atómico/molecular

dispersión de energía y, 347-350

rotacional de, 135

color de, 509

y, 286-287

energía interna y, 339, 340

Ruedas, movimiento de. Véase

Sonda Pioneer 10, rapidez de escape

procesos adiabáticos y, 341-343

entropía y, 348, 349-350

Movimiento rotacional

de, 200

transferencia de calor y, 304,

ley cero de, 350

Ruido, 392

Sonido, 374

308, 312

primera ley de, 339-343, 349-

Ruido blanco, 392

altura y, 376, 393

Temperatura del aire, 305

350

Rumford (Benjamin Thompson),

amplificación de, 378

condensación y, 324-325

procesos adiabáticos y, 341

285, 287, 339

ángulo de incidencia de, 379

presión y, 341-343

segunda ley de, 344-347, 349-

Rutherford, Ernest, 60, 603-604,

batimientos y, 385-387

Temperaturas extremas, adaptación

350

606, 607

calidad de, 395

a, 295

tercera ley de, 350

Ryan, Paul, 331

dispersión de, 511

Tensión, 30, 232-233

Termómetros, 285-286, 287

Rydberg, Johannes, 606-607

efecto Doppler y, 569

sobre arcos, 234-235

infrarrojos, 308-309

en aire

sobre vigas, 232-233

Termómetros centígrados, 286

S

rapidez de, 378-379

superficial, 257-258

Termómetros infrarrojos, 308-309

transmisión de, 376-378

Tensión superficial, 257-258

Termostato, 293

Sagan, Carl, 563

frecuencia de, 376

Teorema trabajo-energía, 115-117

Tesla, Nikola, 453, 474

Salto, tiempo en el aire y, 50, 190

frecuencia natural y, 382

Teoría, 9

Testimonios, frente a evidencia

Saltos cuánticos, 607-608

intensidad de, 394

Teoría corpuscular de la luz, 505,

experimental, 229

Satélite(s), 190-198

musical. Véase Sonidos musicales

553, 584

Thermos, 315

definición de, 190

navegación animal por, 381-

dualidad onda-partícula y,

Thompson, Benjamin, 285, 287

en Sistema de Posicionamiento

382, 387

586-588. Véase también

Thomson, Joseph John (J. J.), 603,

Global (GPS), 197

origen de, 375-376

Dualidad onda-partícula

605, 606

monitorización de la Tierra, 195

rapidez de, 378-379

Teoría cuántica, 584-585, 586

Thomson, William (lord Kelvin),

movimiento de, conservación de

reflexión de, 379-380, 506

nacimiento de, 583-584

286, 337, 339

energía y, 197-198

resonancia y, 382-383

Teoría de la relatividad especial,

Tiempo

órbitas de

reverberación de, 380

658-685

corrimiento al rojo gravitacional

circular, 192-193

sonoridad de, 394

cantidad de movimiento relati-

y, 366, 691-693

elíptica, 194-195

transmisión de, 376-378

vista y, 677-678

distancia en caída libre y, 48

planetas como, 196-197

compresión en, 377-378

contracción de longitud y,

ecuación relativista para, 681

rapidez de escape de, 198-200

rarefacción en, 377-378

675-677

en teoría de la relatividad espe-

Schrödinger, Erwin, 610

unidades de, 394

dilatación del tiempo y, 663-673

cial, 663-675

Seguridad aeroportuaria, espectro-

vibraciones forzadas y, 382

equivalencia entre masa y ener-

espacio-tiempo, 663-668

metría de masas en, 649

Sonidos musicales, 391-403

gía y, 645-648, 678-680

impulso y, 92-95

Segway, Transportador Humano,

altura y, 393

espacio-tiempo y, 663-668

medición de, incertidumbre

144

análisis de Fourier y, 397-399

experimento Michelson-Morley

en, 594

Semiconductores, 412-413

calidad de, 395-396

y, 660-661

rapidez y, 41-42

Señales de radio, AM/FM,

frente a ruido, 392

marco de referencia y, 659-662

relatividad de, 663-675,

386, 548

grabación analógica contra

postulados de, 661-662

691-693

Simultaneidad, 662-663

digital de, 399-400

principio de correspondencia y,

viaje espacial y, 668-675

Síntesis newtoniana, 161

intensidad sonora y sonoridad

680-681

Tiempo "colgado" (en el aire),

Sistema(s)

y, 394

problema de viaje de los gemelos

50, 190

binario, 399

notas y, 392

y, 668-673

Tiempo relativista, 663-675, 664,

caótico, 596

Sonoridad, 394

simultaneidad y, 662-663

691-693

definición de, 340

Steiger, Walter, 627

suma de velocidades y, 673-675

Tierra

desorden en, 348, 349-350

Strassmann, Fritz, 638

Teoría de la relatividad general,

aceleración de, 79

fuerzas en, 77-78

Sublimación, 322

686-697

campo gravitacional de, 161,

Sistema de Posicionamiento Global

Superconductores, 413

corrimiento gravitacional al rojo

170-173

(GPS), 197

electroimanes como, 459-460

y, 366, 691-693

campo magnético de, 462-464

Sistemas binarios, 399

Superficies pulidas

curvatura de espacio-tiempo y,

distancia a la Luna, 5, 152

Sistemas caóticos, 596

anillo de Newton y, 553

695-696

distancia al Sol, 6-7

Snow, C. P., 687

reflexión de, 523-524

doblamiento de luz por gravedad

edad de, 337

Sobretonos, 395

Superposición, de ondas, 549-551

y, 689-691

energía radiante de, 311

Sol. Véase también Solar

ley de gravitación de Newton y,

forma esférica de, 175

campo gravitacional de, 173

694, 697

mareas en, 170

campo magnético de, 463

T

movimiento planetario y, 694

movimiento de, 22, 33-34

distancia desde la Tierra, 6-7

Tabla periódica, 215-218

nueva geometría para, 694-696

rapidez de escape de, 199

eclipse de, 494

transmutación y, 628-630

ondas gravitacionales y, 696

tamaño de, 3

fusión termonuclear en, 650, 651

Taquiones, 675

órbita de Mercurio y, 694

Timbre, 395

rapidez de escape de, 198-200

Tecnología

precesión y, 694

Tiras bimetálicas, 292

tamaño de, 314

beneficios de, 118

principio de equivalencia y, 687-

Tono

Sólidos, 226-243, 321. Véase tam-

valoración de riesgo para, 14

689, 692

armónico, 395

bién Fases de la materia

Tecnología antirruido, 385

Teoría ondulatoria de la luz, 545-

calidad de, 395-396

amorfo, 228

Televisores de plasma, 276

547, 584, 586

parcial, 395

compresión en, 232-235

Temperatura, 285-287. Véase tam-

dualidad onda-partícula y, 588.

Tonos parciales, 395

conducción de sonido en, 376

bién Enfriamiento; Calor

Véase también Dualidad

Torio, transmutación de, 628-629

densidad de, 229-230

aire, 305

onda-partícula

Torre inclinada de Pisa, 23

ÍNDICE

Torricelli, Evangelista, 245, 268

Umbra, 494

relativa, 673-674

resonancia magnética, 465

Trabajo, 110-113

Unidad de masa atómica (uma),

suma de, 673-675

trazadores radiactivos en, 622

definición de, 110

218, 646

tangencial, de proyectiles, 191

Volante de inercia, 136

máquinas y, 120-121

Universo, expansión de, 176

terminal, 66

Volt (V), 433

neto, 115-116

Uranio

Velocidad constante, 43

Volta, Allesandro, 433

potencia y, 112

decaimiento de, 633

Velocidad de deriva, 439

Voltaje, 422, 433

unidad de, 111

en datación radiométrica, 633

Velocidad tangencial de proyectiles,

de corriente CA, 437

Trabajo neto, 115-116

enriquecido, 640-641

191

inducción de, 470-472. Véase

Transferencia de calor, 287-288,

fisión de, 638-649. Véase tam-

Viaje espacial

también Inducción elec-

302-319. Véase también

bién Fisión nuclear

contracción de la longitud y,

tromagnética

Enfriamiento

transmutación de, 628

676-677

ley de Ohm y, 434-437

calentamiento global y, 313-314

vida media de, 625

dilatación del tiempo y, 668-673

Voltímetro, 461

control de, 315

Urano, descubrimiento de, 175

gravedad simulada para,

Volumen

dirección de, 344-347

148-149

de líquido desplazado, 249,

efecto invernadero y, 312-313

ingravidez en, 166-167

250-251. Véase también

en botella de vacío, 315

V

principio de equivalencia y,

Flotabilidad

por conducción, 303-304, 315

Valoración de riesgo, 14

687-689

escalamiento y, 236-239

por convección, 304-306, 315

de irradiación de alimentos, 632

problema del viaje de gemelos y,

frente a masa, 62

por radiación, 307-311, 315

Van Allen, James A., 464

668-673

frente a presión, 270-271

potencial solar y, 314-315

cinturón de radiación, 464

propulsión de cohetes y,

temperatura y, 304, 308, 312

Vapor, 323

687-689

termodinámica y, 336-350. Véase Vapor de agua

teoría de la relatividad especial y,

W

también Termodinámica

condensación y, 323-325

668-675

Watt (W), 112, 440

termos, 315

evaporación y, 321-323

teoría de la relatividad general y,

Watt, James, 112

Transformadores, 453, 475-478

Vaporización, calor latente de,

687-689

Wells, H. G., 125

Transistores, 412-413

330-331

velocidad de escape en, 174

Westerberg, Karl, 20

Transmutación, 628-630

Vector(es), 28-30

Vibración simpática, 383

Westinghouse, George, 452, 474

artificial, 630

cantidad de movimiento

Vibraciones, 357. Véase también

Wheelet, John A., 222

datación radiométrica y, 507

como, 97

Onda(s)

Whitlach, Norman, 391, 392

del agua, 514-515

componentes de, 82-84

de electrones, 489-490

Wiles, Andrew, 520

natural, 628-629

definición de, 28

de péndulo, 358

Willey, Dave, 331

Transpiración, 322

descomposición de 82-84

de sonido, 375-376

Wilson, Robert, 311

Trazadores radiactivos, 621-622

fuerza, 29-30

musical, 393

Trenes

resultante de, 28-29

forzadas, 382

maglev, 459

suma de, 28-29

frente a oscilaciones, 506

Y

movimiento rotacional de

tercera ley de Newton y, 82-85

simpáticas, 383

Yan, Helen, 303, 310

ruedas, 135

velocidad, 51, 84

Vibraciones forzadas, 382

Yin y yang, 596

Trenes maglev, 459

Vectores de fuerza, 29-30

Vida media radiactiva, 625

Young, Thomas, 549-550, 584,

Tritio, fusión de, 651, 652

Vectores de velocidad, 51, 84

Vidrio

588-590

Tuberías de luz, reflexión interna

Velocidad, 42-43. Véase también

índice de refracción de, 526

total en, 533

Rapidez

reflexión interna total en, 532

Tubo de Crookes, 605

aceleración y, 43-46, 50

refracción a través, 524-525

Z

Tubo de rayos catódicos, 605

cambio de, 43

transparencia de, 491-492

Zetterberg, Johan, 265

Tubos de neón

componente horizontal de,

Vigas I, 233

Zetterberg, Per Olof, 265

excitación y, 465

84, 183-185

Vigas, carga soportada por,

líneas espectrales de, 566

componentes vectoriales de,

232-233

plasma en, 276

84, 183-185

Visión, 496-498

Turbogeneradores, 474-475

constante, 43

color, 496-497, 508. Véase tam-

Tyson, Neil deGrasse, 563

de deriva, 439

bién Color(es)

de escape, 174, 198-200

estereoscópica (3D), 557-558

U

de ondas electromagnéticas,

Visión de color, bastones y conos

488-489

en, 496-497, 508

Último teorema (Fermat), 520

frente a rapidez, 42-43, 51

Visión estereoscópica, 557-558

Uma (unidad de masa atómica), 218

instantánea, 41, 46

Visualización médica

ALGUNAS FECHAS SIGNIFICATIVAS EN LA HISTORIA DE LA FÍSICA ca. 320 A.E.A. Aristóteles describe el movimiento en términos de tendencias naturales.

ca. 250 A.E.A. Arquímedes descubre el principio de flotabilidad.

ca. E.A. 150

Ptolomeo refina el sistema del mundo con centro en la Tierra.

1543

Copérnico publica su sistema del mundo con centro en el Sol.

1575-1596

Brahe mide las posiciones precisas de los planetas en el cielo.

1609

Galileo usa por primera vez un telescopio como herramienta astronómica.

1609/1619

Kepler publica tres leyes del movimiento planetario.

1634

Galileo avanza en la comprensión del movimiento acelerado.

1661

Boyle relaciona la presión y el volumen de los gases a temperatura constante.

1676

Roemer demuestra que la luz tiene una rapidez finita.

1678

Huygens desarrolla una teoría ondulatoria de la luz.

1687

Newton presenta la teoría de la mecánica en sus Principia.

1738

Bernoulli explica el comportamiento de los gases en términos de movimientos moleculares.

1747

Franklin sugiere la conservación del "fuego" (carga) eléctrico.

1780

Galvani descubre la "electricidad animal".

1785

Coulomb determina con precisión la ley de fuerza eléctrica.

1795

Cavendish mide la constante gravitacional G.

1798

Rumford argumenta que el calor es una forma de movimiento.

1800

Volta inventa la batería.

1802

Young usa la teoría ondulatoria para explicar la interferencia.

1811

Avogadro sugiere que, a la misma temperatura y presión, todos los gases tienen igual número de moléculas por unidad de volumen.

1815-1820

Young y otros proporcionan evidencia para la naturaleza ondulatoria de la luz.

1820

Oersted descubre el efecto magnético de una corriente eléctrica.

1820

Ampère establece la ley de fuerza que existe entre alambres portadores de corriente.

1821

Fraunhofer inventa la rejilla de difracción.

1824

Carnot afirma que el calor no puede transformarse totalmente en trabajo.

1831

Faraday y Henry descubren la inducción electromagnética.

1842-1843

Mayer y Joule sugieren una ley general de la conservación de energía.

1846

Adams y Leverrier predicen la existencia del planeta Neptuno.

1865

Maxwell proporciona la teoría electromagnética de la luz.

1869

Mendeleev organiza los elementos en una tabla periódica.

1877

Boltzmann relaciona la entropía con la probabilidad.

1885

Balmer encuentra regularidad numérica en el espectro del hidrógeno.

1887

Michelson y Morley fallan en la detección del éter.

1888

Hertz genera y detecta ondas de radio.

1895

Roentgen descubre los rayos X.

1896

Bequerel descubre la radiactividad.

1897

Thomson identifica los rayos catódicos como corpúsculos negativos (electrones).

1900

Planck introduce la idea del cuanto.

1905

Einstein introduce el concepto de corpúsculo de luz (fotón).

1905

Einstein presenta la teoría de la relatividad especial.

1911

Rutherford revela el átomo nuclear.

1913

Bohr proporciona una teoría cuántica del átomo de hidrógeno.

1915

Einstein presenta la teoría de la relatividad general.

1923

Compton, con sus experimentos, confirma la existencia del fotón.

1924

De Broglie presenta la teoría ondulatoria de la materia.

1925

Goudsmit y Uhlenbeck establecen el espín del electrón.

1925

Pauli enuncia el principio de exclusión.

1926

Schrödinger desarrolla la teoría ondulatoria de la mecánica cuántica.

1927

Davisson, Germer y Thomson verifican la naturaleza ondulatoria de los electrones.

1927

Heisenberg propone el principio de incertidumbre.

1928

Dirac mezcla la relatividad y la mecánica cuántica en una teoría del electrón.

1929

Hubble descubre el Universo en expansión.

1932

Anderson descubre la antimateria en forma de un positrón.

1932

Chadwick descubre el neutrón.

1932

Heisenberg proporciona la explicación de neutrón-protón de la

estructura nuclear.

1934

Fermi propone una teoría de la aniquilación y la creación de la materia.

1938

Meitner y Frisch interpretan los resultados de Hahn y Strassmann como fisión nuclear.

1939

Bohr y Wheeler proporcionan una teoría detallada de la fisión nuclear.

1942

Fermi construye y opera el primer reactor nuclear.

1945

Oppenheimer, y su equipo en Los Álamos, crean una explosión nuclear.

1947

Bardeen, Brattain y Shockley desarrollan el transistor.

1956

Reines y Cowan identifican el antineutrino.

1957

Feynman y Gell-Mann explican las interacciones débiles con un neutrino "zurdo".

1960

Maiman inventa el láser.

1965

Penzias y Wilson descubren la radiación de fondo en los restos del Big Bang que aún quedan en el Universo.

1967

Bell y Hewish descubren los pulsares, que son estrellas de neutrones.

1968

Wheeler nombra los agujeros negros.

1969

Gell-Mann sugiere a los quarks como los bloques constructores de los nucleones.

1977

Lederman y su equipo descubren el quark fondo (bottom).

1981

Binning y Rohrer inventan el microscopio de efecto túnel.

1987

Bednorz y Müller descubren la superconductividad de alta temperatura.

1995

Cornell y Wieman crean un "condensado Bose-Einstein" a 20 mil millonésimas de grado.

1998

Perlmutter, Schmidt y Riess descubren la expansión acelerada del Universo.

2000

Pogge y Martini ofrecen evidencia de los agujeros negros supermasivos en otras galaxias.

2000

Un grupo del Fermilab identifica el neutrino tau, el último miembro del grupo de partículas de leptones.

2003

Científicos que estudian la radiación en el Universo establecen la edad del Universo en 13.7 mil millones de años.

2004

Geim y Novoselov descubren el grafeno, una forma de carbono con un grosor de un átomo.

2005

Gerald Gabrielse mide el magnetismo del electrón en 1 parte en un billón.

2006

Un equipo ruso-estadounidense identifica los elementos número 116 y 118.

2009

El catálogo de exoplanetas (planetas que orbitan otras estrellas) crece a más de 350.

2012

El laboratorio CERN anuncia el descubrimiento del bosón de Higgs que fue buscado por largo tiempo.

DATOS FÍSICOS

Categoría

Nombre

Valor

Rapideces

Rapidez de la luz en el vacío, c

2.9979 108 m/s

Rapidez del sonido (20C, 1 atm)

343 m/s

Aceleración

Aceleración estándar de la gravedad, g

9.80 m/s2

Presión

Presión atmosférica estándar

1.01 105 Pa

Distancias

Unidad astronómica (UA; distancia

promedio entre la Tierra y el Sol)

1.50 1011 m

Distancia promedio entre la Tierra y la Luna

3.84 108 m

Radio del Sol (promedio)

6.96 108 m

Radio de la Tierra (ecuatorial)

6.37 106 m

Radio de la órbita de la Tierra

1.50 1011 m 1 UA

Radio de la Luna (promedio)

1.74 106 m

Radio de la órbita de la Luna

3.84 108 m

Radio de Júpiter (ecuatorial)

7.14 107 m

Radio del átomo de hidrógeno (aprox.)

5 1011 m

Masas

Masa del Sol

1.99 1030 kg

Masa de la Tierra

5.98 1024 kg

Masa de la Luna

7.36 1022 kg

Masa de Júpiter

1.90 1027 kg

Masa del protón, mp

1.6726231 1027 kg

938.27231 MeV

Masa del neutrón, mn

1.6749286 1027 kg

939.56563 MeV

Masa del electrón, mc

9.1093897 1031 kg

0.51099906 MeV

Carga

Carga del electrón, e

1.602 1019 C

Otras constantes

Constante gravitacional, G

6.67259 1011 Nm2kg2

Constante de Planck, h

6.6260755 1034 Js

4.1356692 1015 eVs

Número de Avogadro, NA

6.0221367 1023mol

Constante de radiación de cuerpo negro, s

5.67051 108 Wm2 K4

ABREVIATURAS ESTÁNDAR

A

ampere

g

gramo

min minuto

uma

unidad de masa atómica

h

hora

mph milla por hora

atm

atmósfera

hp

caballo de fuerza

N newton

Btu

unidad térmica británica

Hz

hertz

Pa pascal

C

coulomb

in.

pulgada

psi libra por pulgada al cuadrado

8C

grado Celsius

J

joule

s segundo

cal

caloría

K

kelvin

u unidad de masa atómica unificada

eV

electrón-volt

kg

kilogramo

V volt

8F

grado Fahrenheit

lb

libra

W watt

ft

pie

m

metro

V

ohm

NÚMEROS EXPRESADOS EN NOTACIÓN CIENTÍFICA

1,000,000 10 10 10 10 10 10

106 mega

100,000 10 10 10 10 10

105

10,000 10 10 10 10

104

1,000 10 10 10

103 kilo

100 10 10

102

10 10

101

1 1

100

0.1 110

101

0.01 1100 1102

102 centi

0.001 11,000 1103

103 mili

0.0001 110,000 1104

104

0.00001 1100,000 1105

105

0.000001 11,000,000 1106

106 micro

FACTORES DE CONVERSIÓN

Longitud y volumen

Presión

1 pulgada 2.54 cm (exacto)

1 Pa 1 Nm2

1 pie 0.3048 m (exacto)

1 atm 1.01325 105 Pa

1 m 39.37 in.

1 lbin.2 6,895 Pa

1 mi 1.6093440 km

1 litro 103 cm3 103 m3

Energía y potencia

1 cal 4.184 J

Tiempo

1 kWh 3.60 106 J

1 año 3651/4 días 3.1558 107 s

1 eV 1.602 1019 J

1 d 86,400 s

1 u 931.5 MeV

1 h 3,600 s

1 hp 746 W

Masa

Rapidez

1 kg 1,000 g

1 ms 3.60 kmh 2.24 mih

1 kg tiene un peso de 2.205 lb

1 kmh 0.621 mih

1 uma 1.6605 1027 kg

Fuerza

1 lb 4.448 N

Acerca de la portada

En la portada se muestra un arreglo de paneles solares bajo un bello cielo azul. En cada edición de Física conceptual, Paul G. Hewitt busca que sus estudiantes se deleiten con el conocimiento de esta ciencia, ya que su comprensión les ayudará a ver que ésta se encuentra en todo lo que les rodea, incluso en la tecnología que utilizan a diario.

CONCEPTUAL

Decimosegunda edición

Haciendo de la física una delicia

El presente texto es, desde hace 30 años, el más vendido y sigue siendo un punto de referencia. En Física conceptual, decimosegunda edición, el autor presenta un texto convincente donde la física es interesante, comprensible y relevante para quienes no son científicos. Como siempre, la idea principal del libro se enfoca, en primer lugar, en los conceptos y después en los cálculos.

C

Esta decimosegunda edición deleitará a los estudiantes con screencasts infor-

ON

mativos y divertidos, para los cuales deberán utilizar un dispositivo móvil para ver demostraciones en video de Paul Hewitt y Hewitt-Drew-It, al instante que les permitirá una mejor comprensión conceptual de la física. Asimismo, la actualización del

C

contenido, las aplicaciones y las nuevas actividades de aprendizaje darán mayor

E

sentido al estudio de la física.

PT

Física conceptual de Hewitt es famoso por atraer a los estudiantes con analogías

UA

e imágenes de la vida real, con lo que construye una comprensión conceptual más sólida de los principios físicos, la cual va desde la mecánica clásica hasta la física moderna.

L

Decimosegunda

edición

www.pearsonenespañol.com

ISBN 978-607-32-3822-9

HEWI9107_12_cvrmech_SE esp.indd 1

23/05/16 16:25

Document Outline

- Cover
- Title
- Copyright
- Contents
- Conceptual Physics Photo Album
- To the Student
- To the Instructor
- Acknowledgments
- 1 About Science
  - 1.1 Scientific Measurements
    - How Eratosthenes Measured the Size of Earth
    - Size of the Moon
    - Distance to the Moon
    - Distance to the Sun
    - Size of the Sun
    - Mathematics—The Language of Science
  - 1.2 Scientific Methods
    - The Scientific Attitude
  - 1.3 Science, Art, and Religion
    - Pseudoscience
  - 1.4 Science and Technology
    - Risk Assesment
  - 1.5 Physics—The Basic Science
  - 1.6 In Perspective
- Part One Mechanics
  - 2 Newton's First Law of Motion–Inertia
    - 2.1 Aristotle on Motion
      - Copernicus and the Moving Earth
      - Aristotle (384–322 bc)
    - 2.2 Galileo's Experiments
      - Leaning Tower
      - Inclined Planes
      - Galileo Galilei (1564–1642)
    - 2.3 Newton's First Law of Motion
      - Personal Essay
    - 2.4 Net Force and Vectors
      - Force Vectors
    - 2.5 The Equilibrium Rule
      - Practicing Physics
    - 2.6 Support Force

- 2.7 Equilibrium of Moving Things
- 2.8 The Moving Earth

3 Linear Motion
- 3.1 Motion Is Relative
- 3.2 Speed
  - Instantaneous Speed
  - Average Speed
- 3.3 Velocity
  - Constant Velocity
  - Changing Velocity
- 3.4 Acceleration
  - Acceleration on Galileo's Inclined Planes
- 3.5 Free Fall
  - How Fast
  - How Far
  - Hang Time
  - How Quickly "How Fast" Changes
- 3.6 Velocity Vectors

4 Newton's Second Law of Motion
- 4.1 Force Causes Acceleration
- 4.2 Friction
- 4.3 Mass and Weight
  - Mass Resists Acceleration
- 4.4 Newton's Second Law of Motion
- 4.5 When Acceleration Is g—Free Fall
- 4.6 When Acceleration Is Less Than g—Nonfree Fall

5 Newton's Third Law of Motion
- 5.1 Forces and Interactions
- 5.2 Newton's Third Law of Motion
  - Defining Your System
- 5.3 Action and Reaction on Different Masses
  - Practicing Physics: Tug-of-War
- 5.4 Vectors and the Third Law
- 5.5 Summary of Newton's Three Laws

6 Momentum
- 6.1 Momentum
- 6.2 Impulse
- 6.3 Impulse Changes Momentum
  - Case 1: Increasing Momentum
  - Case 2: Decreasing Momentum Overa Long Time
  - Case 3: Decreasing Momentum Overa Short Time

- 6.4 Bouncing
- 6.5 Conservation of Momentum
  - Conservation Laws
- 6.6 Collisions
- 6.7 More Complicated Collisions

7 Energy
- 7.1 Work
  - Power
  - Mechanical Energy
- 7.2 Potential Energy
- 7.3 Kinetic Energy
- 7.4 Work–Energy Theorem
- 7.5 Conservation of Energy
  - Energy and Technology
  - Circus Physics
  - Recycled Energy
- 7.6 Machines
- 7.7 Efficiency
- 7.8 Sources of Energy
  - Junk Science

8 Rotational Motion
- 8.1 Circular Motion
  - Whels on Railroad Trains
- 8.2 Rotational Inertia
- 8.3 Torque
- 8.4 Center of Mass and Center of Gravity
  - Locating the Center of Gravity
  - Stability
- 8.5 Centripetal Force
  - Practicing Physics:Water-Bucket Swing
- 8.6 Centrifugal Force
  - Centrifugal Force in a Rotating Reference Frame
  - Simulated Gravity
- 8.7 Angular Momentum
- 8.8 Conservation of Angular Momentum

9 Gravity
- 9.1 The Universal Law of Gravity
- 9.2 The Universal Gravitational Constant, G
- 9.3 Gravity and Distance: The Inverse-Square Law
- 9.4 Weight and Weightlessness
- 9.5 Ocean Tides
  - Tides in the Earth and Atmosphere
  - Tidal Bulges on the Moon

- 9.6 Gravitational Fields
  - Gravitational Field Inside a Planet
  - Einstein's Theory of Gravitation
- 9.7 Black Holes
- 9.8 Universal Gravitation

10 Projectile and Satellite Motion
- 10.1 Projectile Motion
  - Projectiles Launched Horizontally
  - Projectiles Launched at an Angle
  - Practicing Physics: Hands-On Dangling Beads
  - Hang Time Revisited
- 10.2 Fast-Moving Projectiles—Satellites
- 10.3 Circular Satellite Orbits
- 10.4 Elliptical Orbits
  - World Monitoring by Satelite
- 10.5 Kepler's Laws of Planetary Motion
  - Finding Your Way
- 10.6 Energy Conservation and Satellite Motion
- 10.7 Escape Speed

Part Two Properties of Matter

11 The Atomic Nature of Matter
- 11.1 The Atomic Hypothesis
  - Faling Alice
- 11.2 Characteristics of Atoms
- 11.3 Atomic Imagery
- 11.4 Atomic Structure
  - The Elements
- 11.5 The Periodic Table of the Elements
  - Relative Sizes of Atoms
- 11.6 Isotopes
- 11.7 Compounds and Mixtures
- 11.8 Molecules
- 11.9 Antimatter
  - Dark Matter

12 Solids
- 12.1 Crystal Structure
  - Crystal Power
- 12.2 Density
- 12.3 Elasticity
- 12.4 Tension and Compression
  - Practicing Physics: stick strength
- 12.5 Arches
  - Additive Manufacturing or 3-D Printing

- 12.6 Scaling
- 13 Liquids
  - 13.1 Pressure
  - 13.2 Pressure in a Liquid
  - 13.3 Buoyancy
  - 13.4 Archimedes' Principle
  - 13.5 What Makes an Object Sink or Float?
  - 13.6 Flotation
    - Floating Mountains
  - 13.7 Pascal's Principle
  - 13.8 Surface Tension
  - 13.9 Capillarity
- 14 Gases
  - 14.1 The Atmosphere
  - 14.2 Atmospheric Pressure
    - The Barometer
  - 14.3 Boyle's Law
  - 14.4 Buoyancy of Air
  - 14.5 Bernoulli's Principle
    - Applications of Bernoulli's Principle
    - Practicing Physics
  - 14.6 Plasma
    - Plasma in the Everyday World
    - Plasma Power

- Part Three Heat
  - 15 Temperature, Heat,and Expansion
    - 15.1 Temperature
    - 15.2 Heat
      - Measuring Heat
    - 15.3 Specific Heat Capacity
    - 15.4 The High Specific Heat Capacity of Water
    - 15.5 Thermal Expansion
      - Expansion of Water
      - Life at the Extremes
  - 16 Heat Transfer
    - 16.1 Conduction
    - 16.2 Convection
      - Practicing Physics
    - 16.3 Radiation
      - Emission of Radiant Energy
      - Absorption of Radiant Energy
      - Reflection of Radiant Energy
      - Cooling at Night by Radiation
    - 16.4 Newton's Law of Cooling

        - 16.5 The Greenhouse Effect
        - 16.6 Climate Change
        - 16.7 Solar Power
            - Practicing Physics
        - 16.8 Controlling Heat Transfer
    - 17 Change of Phase
        - 17.1 Phases of Matter
        - 17.2 Evaporation
        - 17.3 Condensation
            - Condensation in the Atmosphere
            - Fog and Clouds
        - 17.4 Boiling
            - Geysers
            - Boiling Is a Cooling Process
            - Boiling and Freezing at the Same Time
        - 17.5 Melting and Freezing
            - Regelation
        - 17.6 Energy and Changes of Phase
            - Practicing Physics
    - 18 Thermodynamics
        - 18.1 Thermodynamics
        - 18.2 Absolute Zero
            - Internal Energy
        - 18.3 First Law of Thermodynamics
        - 18.4 Adiabatic Processes
        - 18.5 Meteorology and the First Law
        - 18.6 Second Law of Thermodynamics
            - Heat Engines
            - Thermodynamics Dramatized!
        - 18.7 Energy Tends to Disperse
        - 18.8 Entropy
- Part Four Sound
    - 19 Vibrations and Waves
        - 19.1 Good Vibrations
            - Vibration of a Pendulum
        - 19.2 Wave Description
        - 19.3 Wave Motion
            - Practicing Physics
            - Transverse Waves
            - Longitudinal Waves
        - 19.4 Wave Speed
        - 19.5 Wave Interference
            - Standing Waves
        - 19.6 Doppler Effect

- 19.7 Bow Waves
- 19.8 Shock Waves
- 20 Sound
  - 20.1 Nature of Sound
    - Origin of Sound
    - Media That Transmit Sound
  - 20.2 Sound in Air
    - Loudspeaker
    - Speed of Sound in Air
    - Practicing Physics
    - Energy in Sound Waves
  - 20.3 Reflection of Sound
  - 20.4 Refraction of Sound
  - 20.5 Forced Vibrations
    - Natural Frequency
  - 20.6 Resonance
  - 20.7 Interference
  - 20.8 Beats
    - Radio Broadcasts
- 21 Musical Sounds
  - 21.1 Noise and Music
  - 21.2 Pitch
  - 21.3 Sound Intensity and Loudness
  - 21.4 Quality
  - 21.5 Musical Instruments
  - 21.6 Fourier Analysis
  - 21.7 From Analog to Digital

- Part Five Electricity and Magnetism
  - 22 Electrostatics
    - 22.1 Electricity
      - Electrical Forces
    - 22.2 Electric Charges
    - 22.3 Conservation of Charge
      - Electronics Technology and Sparks
    - 22.4 Coulomb's Law
    - 22.5 Conductors and Insulators
      - Semiconductors
      - Superconductors
    - 22.6 Charging
      - Charging by Friction and Contact
      - Charging by Induction
    - 22.7 Charge Polarization
    - 22.8 Electric Field
      - Microwave Oven

- Electric Shielding
- 22.9 Electric Potential
  - Electric Energy Storage
  - Van de Graaff Generator
- 23 Electric Current
  - 23.1 Flow of Charge and Electric Current
  - 23.2 Voltage Sources
  - 23.3 Electrical Resistance
  - 23.4 Ohm's Law
    - Ohm's Law and Electric Shock
  - 23.5 Direct Current and Alternating Current
    - Converting AC to DC
  - 23.6 Speed and Source of Electrons in a Circuit
  - 23.7 Electric Power
  - 23.8 Lamps
  - 23.9 Electric Circuits
    - Series Circuits
    - Fuel Cels
    - Parallel Circuits
    - Parallel Circuits and Overloading
    - Safety Fuses
- 24 Magnetism
  - 24.1 Magnetism
  - 24.2 Magnetic Poles
  - 24.3 Magnetic Fields
  - 24.4 Magnetic Domains
  - 24.5 Electric Currents and Magnetic Fields
    - Practicing Physics
  - 24.6 Electromagnets
    - Superconducting Electromagnets
  - 24.7 Magnetic Forces
    - On Moving Charged Particles
    - On Current-Carrying Wires
    - Electric Meters
    - Electric Motors
  - 24.8 Earth's Magnetic Field
    - Cosmic Rays
  - 24.9 Biomagnetism
    - MRI: Magnetic Resonance Imaging
- 25 Electromagnetic Induction
  - 25.1 Electromagnetic Induction
  - 25.2 Faraday's Law
  - 25.3 Generators and Alternating Current
  - 25.4 Power Production

- Turbogenerator Power
- MHD Power
- 25.5 Transformers
- 25.6 Self-Induction
- 25.7 Power Transmission
- 25.8 Field Induction

- Part Six Light
  - 26 Properties of Light
    - 26.1 Electromagnetic Waves
    - 26.2 Electromagnetic Wave Velocity
    - 26.3 The Electromagnetic Spectrum
      - Fractal Antenas
    - 26.4 Transparent Materials
    - 26.5 Opaque Materials
      - Shadows
    - 26.6 Seeing Light—The Eye
  - 27 Color
    - 27.1 Color in Our World
    - 27.2 Selective Reflection
    - 27.3 Selective Transmission
    - 27.4 Mixing Colored Lights
      - Primary Colors
      - Complementary Colors
    - 27.5 Mixing Colored Pigments
    - 27.6 Why the Sky Is Blue
    - 27.7 Why Sunsets Are Red
      - Practicing Physics
    - 27.8 Why Clouds Are White
    - 27.9 Why Water Is Greenish Blue
  - 28 Reflection and Refraction
    - 28.1 Reflection
      - Principle of Least Time
    - 28.2 Law of Reflection
      - Plane Mirrors
      - Diffuse Reflection
    - 28.3 Refraction
      - Index of Refraction
      - Mirage
    - 28.4 Cause of Refraction
    - 28.5 Dispersion and Rainbows
    - 28.6 Total Internal Reflection
    - 28.7 Lenses
      - Image Formation by a Lens
      - Practicing Physics

        - 28.8 Lens Defects
    - 29 Light Waves
        - 29.1 Huygens' Principle
        - 29.2 Diffraction
        - 29.3 Superposition and Interference
        - 29.4 Thin-Film Interference
            - Single-Color Thin-Film Interference
            - Interference Colors
            - Practicing Physics
        - 29.5 Polarization
            - Three-Dimensional Viewing
        - 29.6 Holography
    - 30 Light Emission
        - 30.1 Light Emission
        - 30.2 Excitation
        - 30.3 Emission Spectra
        - 30.4 Incandescence
        - 30.5 Absorption Spectra
        - 30.6 Fluorescence
        - 30.7 Phosphorescence
        - 30.8 Lamps
            - Incandescent Lamp
            - Fluorescent Lamp
            - Compact Fluorescent Lamp
            - Light-Emitting Diode
        - 30.9 Lasers
    - 31 Light Quanta
        - 31.1 Birth of the Quantum Theory
        - 31.2 Quantization and Planck's Constant
        - 31.3 Photoelectric Effect
        - 31.4 Wave–Particle Duality
        - 31.5 Double-Slit Experiment
        - 31.6 Particles as Waves: Electron Diffraction
        - 31.7 Uncertainty Principle
        - 31.8 Complementarity
            - Predictability and Chaos
- Part Seven Atomic and Nuclear Physics
    - 32 The Atom and the Quantum
        - 32.1 Discovery of the Atomic Nucleus
        - 32.2 Discovery of the Electron
        - 32.3 Atomic Spectra: Clues to Atomic Structure
        - 32.4 Bohr Model of the Atom
        - 32.5 Explanation of Quantized Energy Levels: Electron Waves

- 32.6 Quantum Mechanics
- 32.7 Correspondence Principle
  - Higs Boson
- 33 The Atomic Nucleus and Radioactivity
  - 33.1 X -rays and Radioactivity
  - 33.2 Alpha, Beta, and Gamma Rays
  - 33.3 Environmental Radiation
    - Units of Radiation
    - Doses of Radiation
    - Radioactive Tracers
  - 33.4 The Atomic Nucleus and the Strong Force
  - 33.5 Radioactive Half-Life
  - 33.6 Radiation Detectors
  - 33.7 Transmutation of Elements
    - Natural Transmutation
    - Artificial Transmutation
  - 33.8 Radiometric Dating
    - Food Irradiation
- 34 Nuclear Fission and Fusion
  - 34.1 Nuclear Fission
  - 34.2 Nuclear Fission Reactors
    - Plutonium
  - 34.3 The Breeder Reactor
  - 34.4 Fission Power
  - 34.5 Mass–Energy Equivalence
    - Physics at Airport Security
  - 34.6 Nuclear Fusion
  - 34.7 Controlling Fusion

- Part Eight Relativity
  - 35 Special Theory of Relativity
    - 35.1 Motion Is Relative
      - Michelson–Morley Experiment
    - 35.2 Postulates of the Special Theory of Relativity
    - 35.3 Simultaneity
    - 35.4 Spacetime and Time Dilation
      - Clockwatching on a Troley Car Ride
      - The Twin Trip
    - 35.5 Addition of Velocities
      - Space Travel
      - Century Hoping
    - 35.6 Length Contraction
    - 35.7 Relativistic Momentum
    - 35.8 Mass, Energy, and E 5 mc 2
    - 35.9 The Correspondence Principle

- *36 General Theory of Relativity*
  - *36.1 Principle of Equivalence*
  - *36.2 Bending of Light by Gravity*
  - *36.3 Gravity and Time: Gravitational Red Shift*
  - *36.4 Gravity and Space: Motion of Mercury*
  - *36.5 Gravity, Space, anda New Geometry*
  - *36.6 Gravitational Waves*
  - *36.7 Newtonian and Einsteinian Gravitation*
- *Epilogue*
- *Appendix A On Measurement and Unit Conversions*
- *Appendix B More About Motion*
- *Appendix C Graphing*
- *Appendix D Vector Applications*
- *Appendix E Exponential Growth and Doubling Time*
- *Odd-Numbered Answers*
- *Glossary*
- *Credits*
- *Index*
  - *A*
  - *B*
  - *C*
  - *D*
  - *E*
  - *F*
  - *G*
  - *H*
  - *I*
  - *J*
  - *K*
  - *L*
  - *M*
  - *N*
  - *O*
  - *P*
  - *Q*
  - *R*
  - *S*
  - *T*
  - *U*
  - *V*
  - *W*
  - *X*
  - *Y*
  - *Z*